

POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Kızıl ötesi görüntülerden binalardaki ısı köprüsünün belirlenmesi

Determination of thermal bridge of the buildings from infrared images

***Yazar(lar) (Author(s))**: Önder Halis BETTEMİR[1]*

ORCID[1]: 0000-0002-5692-7708

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Bettemir Ö.H., "Kızıl ötesi görüntülerden binalardaki ısı köprüsünün belirlenmesi", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Bettemir Ö.H., "Kızıl ötesi görüntülerden binalardaki ısı köprüsünün belirlenmesi", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: **10.2339/politeknik.1144858**

Kızıl Ötesi Görüntülerden Binalardaki Isı Köprüsünün Belirlenmesi

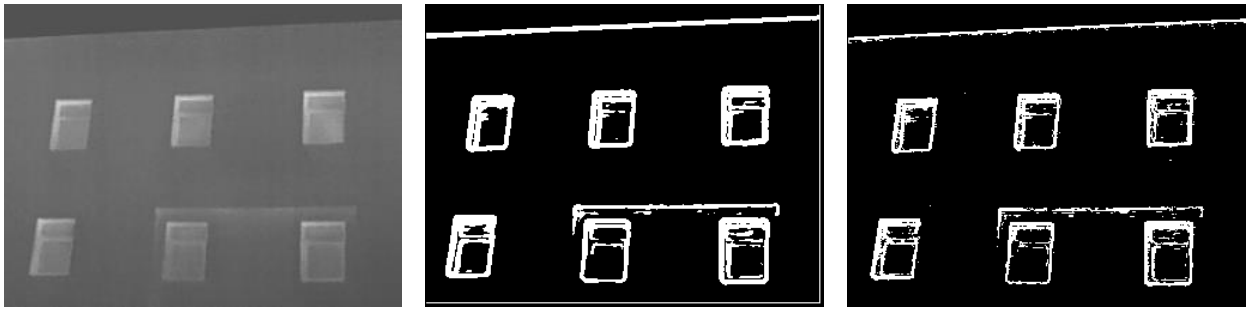
Determination of Thermal Bridge of the Buildings from Infrared Images

Önemli noktalar (Highlights)

- *Isı yalıtımı zararsız yöntemlerle ölçüldü. / Thermal insulation is measured by nondestructive methods.*
- *Girdi parametresi olmadan analizler yapıldı. / Analysis are conducted without any input parameter.*
- *Isı kaybına yol açan yapı elemanları tespit edildi. / Structural elements causing heat loss are identified.*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Binanın ısı kaybına yol açan kısımlarının belirlenebilmesi için binanın içeriden ısıtıldığı kış gününde dışarından termal görüntüsü alındı. Termal görüntü üzerinde kenar belirlemesi yapıldı ve Otsu eşiği kullanılarak ısı kayıp bölgeleri tespit edildi. */Thermal images were taken from the outside on a winter day when the building was heated from the inside to identify the parts of the building that cause heat loss. Edge detection is performed on the thermal images and heat loss zones are detected by the Otsu threshold.*



Şekil. A Termal görüntünün Canny 0,25 ile Modifiye Frei-Chen 0,25 kenar belirleme operatörleri ile tespit edilen ısı kayıpları. **/ Figure. A** Detected heat loss portions from the thermal image by Canny 0,25 and Modified Frei-Chen 0,25 edge detection operators.

Amaç (Aim)

İnsan müdahalesi olmadan termal görüntülerden ısı kaybını belirleyebilen bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. / Development of a method that determines heat loss from thermal images without human intervention is aimed.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Binaların farklı cephelerinden alınan termal görüntüler literatürden derlenen kenar belirleme ve Otsu eşik belirleme yöntemi ile analiz edildi. / Thermal images taken from different facades of the buildings were analyzed with edge detection and Otsu threshold detection method compiled from the literature.

Özgünlük (Originality)

Parametre girilmeden ısı kaybını tespit eden yöntem geliştirilmiştir. / A method that detects heat loss without entering a parameter is developed.

Bulgular (Findings)

Denenen yöntemler arasında ısı kayıplarını en başarılı biçimde tespit eden yöntem Modiye II Frei Chen 0.5 ve ikinci derece Laplace 0.5'dir. / The method that most successfully detects heat losses is Modiye II Frei Chen 0.5 and second order Laplace 0.5 among the examined methods,

Sonuç (Conclusion)

Uzman görüşü ihtiyacı olmadığı için her görüntüye bir eşik değerinin tayin edilmesine gerek kalmamış ve ısı kaybının tespit edilmesi için gereken insan emeği önemli ölçüde azaltılmıştır. / There is no need to assign a threshold value to each image since the need for an expert opinion is eliminated and the human effort required to detect heat loss is significantly reduced.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kızıl Ötesi Görüntülerden Binalardaki Isı Köprüsünün Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Önder Halis BETTEMİR[1*]

[1]Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İnönü Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.07.2022 ; Kabul/Accepted : 06.12.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2023)

ÖZ

İnşaat sürecinde ısı yalıtımı imalatının kalitesi denetlenmediği için Türkiye'deki mevcut binaların büyük bir kısmının ısı yalıtım performansları bilinememektedir. Türkiye'deki yapı stoğunun büyüklüğü göz önüne alındığında binalardaki ısı yalıtım değerlerinin sıvanın kazınıp ısı yalıtım malzemesinin incelenmesi ile belirlenmesi uygulanabilir bir çözüm değildir. Bu çalışmada binalardaki ısı köprülerini binaların termal görüntülerini işleyerek belirleyen bir yöntem önerilmiştir. Yöntem termal görüntünün analiz edilerek yapı elemanlarının ısı kaybı var ve yok olarak sınıflandırılması ve termal görüntünün benirizasyonuna dayanmaktadır. Benirizasyon için adaptif yerel eşikleme ile küresel eşikleme yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan yöntemler sınıflandırma için bir eşik değerine ihtiyaç duymaktadır. Tüm görüntüler için geçerli bir eşik değeri belirlemek mümkün olmadığı için Otsu algoritması ile eşik değeri belirlenmiştir. Eşik belirleme işlemi termal görüntü üzerinde ve termal görüntüden elde edilen kenar görüntüleri üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen eşik değerleri termal görüntü ve kenar görüntüleri üzerinde uygulanmıştır. Literatürden derlenen kenar belirleme algoritmaları beş adet termal görüntü incelenerek karşılaştırılmış ve Modifiye II Frei-Chen ve ikinci derece Laplace operatörü ile daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanması ile mevut yapı stoğunun ısı yalıtım özelliğinin hızlı, ekonomik ve güvenilir biçimde tespit edilebileceği vaka çalışmaları sonucunda belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kenar belirleme, benirizasyon, otsu algoritması.

Determination of Thermal Bridge of the Buildings from Infrared Images

ABSTRACT

Vast majority of the existing buildings in Türkiye are not inspected for thermal insulation quality during the construction process therefore, thermal insulation performance of the existing buildings cannot be known. Measuring the thermal insulation performance of the buildings by scraping the plaster and examining the heat insulation material is not a viable solution when the size of the building stock of Türkiye is considered. In this study, detection of thermal bridges of the buildings by processing the thermal images of the buildings is proposed. The method is based on the binarization of the thermal image by the classification of the building elements as heat loss element or no heat loss element by analyzing the thermal image of the building. Global threshold methods and adaptive local threshold methods applied for binarization. All of the implemented methods require a threshold value for the classification. Determining a valid threshold value for all images is not possible therefore the threshold value is determined by the Otsu algorithm. Threshold determination process is executed both on the thermal image and the edge image. Obtained threshold values are implemented on the thermal images and the edge images. Local edge detection algorithms derived from the literature are compared by examining five thermal images and the comparison revealed that the Modified II Frei-Chen and Second-order Laplace operator provided the most suitable result. The case studies revealed that the thermal insulation performance of the existing building stock can be determined quickly, economically and reliably by implementing the proposed method.

Keywords: Edge detection, binarization, otsu algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizdeki mevcut yapı stoğunun ısı yalıtım kalitesi hakkında çok az güvenilir veri bulunmaktadır. Yapı denetim firmaları denetledikleri konut inşaatlarının ısı yalıtımı ile ilgili iş kalemlerinin yapımını denetlememektedir. Bunun sonucunda yapıda hangi ısı yalıtım malzemesinin ne kadar kalınlıkta kullanıldığı ve nasıl bir işçilik kalitesi ile inşa edildiği belgelenmemektedir. Sadece kurumsal inşaat firmalarının gerçekleştirdiği inşaatlarda kendi iç denetimleri gereği kullanılan yalıtım malzemesi ve kalınlığı raporlanmaktadır. Ayrıca ısı yalıtım malzemelerinin yalıtım performansı zamanla azalmaktadır. Güneşlenme sonucu ısı yalıtım malzemesinin ısınması veya kışın sıva altına nüfuz eden nemin donma çözünmeye maruz kalması ısı yalıtım malzemesinin performans düşüşünü hızlandırmaktadır. Yalıtım malzemesini oluşturan kimyasalların zamanla bozulması da ısı yalıtım performansını olumsuz

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : onder.bettemir@inonu.edu.tr

ÖN İNCELEME

etkilemektedir. Bunun sonucunda inşasının üzerinden 10-15 yıl geçen bir yapının ısı yalıtım performansında düşüş görülebilmektedir.

Isı yalıtım malzemesi sıvanın altında kaldığı için ısı yalıtım malzemesinin doğrudan görerek tespit edilmesi zahmetli ve binaya zarar veren bir işlemdir. Ayrıca ısı yalıtım performansı bilinmeyen binaların fazla oluşu göz önüne alındığında ısı yalıtım performansının doğrudan muayene ile gerçekleştirilmesi hem çok zaman alıcı hem de çok maliyetli olacaktır. Bunun yerine yapının içeriden ısıtıldığı dönemlerde ısı kaybına yol açan kesimlerin termal kamera ile belirlenmesi daha hızlı olacaktır. Ülkemizdeki yapı stoğunun büyüklüğü göz önüne alındığında görüntülerin insan emeği ile incelenip ısı kaybına yol açan kısımların tespit edilmesi de uygulanabilir bir yöntem olmayacaktır. Bu nedenle ısı kaybına neden olan kısımların tespiti insan müdahalesi olmadan gerçekleştirilmelidir. Görüntü işleme yöntemleri ile yapılan sınıflandırmada yaygın biçimde uzman görüşü olarak tanımlanabilecek bir eşik değer kullanılmaktadır. Eşik değer görüntü alınırken ortamın parlaklık değerine, kamera sensörlerinin algılama düzeyine ve görüntünün arka planına çok bağlıdır. Bu nedenle eşik değerin insan tarafından görüntüye özel belirlenmesi ölçüm çalışmalarını yavaşlatacaktır.

Bu çalışmada dışarıdan herhangi bir eşik değere ihtiyaç duymadan eşik değeri Otsu Algoritması ile belirleyip benirizasyon ile ısı kaybına yol açan yapı kısımlarını belirleyen bir sürecin oluşturulması amaçlanmıştır. Yapıların içeriden ısıtıldığı kış aylarında yapının dışarıdan termal kamera ile termal görüntüsünün alınıp, görüntü işleme teknikleri kullanılarak görüntü üzerinde en az insan müdahalesi ile ısı kaybına yol açan yapı elemanlarının tespiti amaçlanmaktadır. Belirtilen amaca ulaşmak için termal görüntülere doğrudan Otsu eşik belirleme algoritması uygulayarak ve literatürden derlenen 12 kenar belirleme operatörünü termal görüntülere uygulanarak elde edilen kenar görüntülerine Otsu eşik belirleme algoritmasını uygulayarak eşik değerler belirlenmiştir. Eşik değerin kendisi, yarısı ve çeyreği uygulanarak ısı kaybına yol açan kesimlerin tespit edilme başarısı incelenmiştir.

Makalenin ikinci bölümünde ısı kayıplarının termal görüntülerden belirlenmesi ve benirizasyon ile ilgili literatürdeki çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde Otsu eşik belirleme algoritması ile uygulanan kenar belirleme operatörleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde gerçekleştirilen vaka çalışmasının sonuçları sunulmuş, beşinci bölümde elde edilen sonuçlar ve önerilen yöntemin başarısı tartışılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları (YSA) görüntü işleme ve sınıflandırma için yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Belirtilen yöntemler binalardaki ısı kaybının tespiti için gerçekleştirilen çalışmalarda da uygulanmıştır. Kızılötesi görüntüleme ile ısı kaybının tespiti için görüntü alınması sırasında ölçümlerin hassasiyeti yüzeyin yayım özelliğine, atmosferdeki parçacıkların salınımına, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, görüntüleme açısı ve nesne ile kamera arasındaki mesafeye bağlıdır [3]. İç ve dış ortam sıcaklık farkının en az 10 ^{0}C olması, rüzgâr hızının en fazla 5 m/s olması, ölçülen yüzeyin görüntüleme sırasında doğrudan güneş ışınımına maruz kalmaması gerekmektedir. Nitel analizde sıcaklık değeri atanmadan termal aykırılıkların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Pencereleri çevreleyen nesnelerin yansımaları, gökyüzü sıcaklığının hatalı ölçümü ve düşük emisyonlu cam kullanılması ölçüm sonuçlarını etkilemektedir [4]. Malzemelerin farklı yayınım katsayılarına sahip olması ölçüm sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve görüntülenen nesne ile aradaki mesafe ölçüm doğruluğunu etkilemektedir [5].

Wardlaw vd. hareket ile nesne (structure from motion) algoritmasıyla yapının 3 Boyutlu termal görüntüsünü farklı açı ve konumlardan elde edilen termal görüntülerle oluşturmuş ve ısı kaybına yol açan bölgeleri manuel olarak tespit etmiştir [3]. Mayer vd. Almanya'da 1950-1969 yılları arasında inşa edilen yapıların ısı yalıtım performansları ve ısı kaybına yol açan kesimlerinin tespiti için insansız hava aracı (İHA) ile termal görüntüler almıştır. Elde edilen görüntüleri ThermCad yazılımı ile analiz ederek pencere eşiği, balkon döşemesi, lento, çatı penceresi, pencere kasası, kat döşemesi, mahya, çatı katı kanyaklı ısı kayıplarını manuel olarak belirlemiştir [6]. Mayer vd. 917 görüntü ve 6895 adet bilgi içeren veritabanı ile beslenmiş YSA ile bina çatılarında oluşan ısı kayıplarını tespit etmiştir. Mask R-CNN mimarisi ile oluşturulan YSA'yı eğitmek için 717 eğitme ve 200 test görüntüsü kullanılmış ve %15 mertebesinde hata oranı ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir [7]. Hou vd. derin evrişimli sinir ağı araçlarını kullanarak İHA ile elde edilen optik termal görüntülerden binalardaki ısı kayıplarını tespit etmiştir. Optik ve termal görüntüler Pyramid Scene Parsing Network algoritması ile birleştirilerek çatı, bina yüzeyi, çatı pencereleri ve arabalar olmak üzere 5 nesne tespit edilmiştir. 4190 eğitme ve 1000 test görüntüsü kullanılarak DeepLabv3 ve Mask R-CNN mimarisine sahip YSA ile ısı kaybı bölgeleri belirlenmiştir. Uygulamadaki en önemli sorunun caddedeki araçların ısı kaybı noktası olarak tanımlanması olduğu belirtilmiştir [8]. Hou vd. Üretken Düşman Ağları (Generative Adversarial Network) tabanlı yöntemle optik görüntüleri benzetimle termal görüntüye dönüştürmüştür. 14.000 görüntüden oluşan eğitme seti ile beslenen YSA ile optik görüntüler termal eşdeğerlerine dönüştürülmüştür [9]. Arjoune vd. K-means ve eşik tabanlı sınıflandırma olmak üzere 2 sınıflandırma yöntemini kullanarak bina yüzeyinin

ÖRNEK GÖRÜNÜM

sıcaklığını ve yüzeye ait kümülatif U değerini tahmin eden bir yöntem geliştirmiştir. İHA ile elde edilmiş 42.439 görüntü ile manuel biçimde belirlenmiş pencere, cam, duvar ve ağaçlar ile YSA eğitilmiştir. Ampirik formüllerle bina cephesini oluşturan elemanların ısı iletim katsayıları tahmin edilmiştir. Fakat tahmin değerleri duvarlar için gerçek değerin 4 katı, pencereler için ise yarısı civarında sonuçlar vermiştir [10]. Pavlović ve Barbarić Termography Studio yazılımını kullaranarak termal görüntüyü sıcaklık ölçer verileri ile destekleyerek duvarın yayınım (emissivity) ölçümünü gerçekleştirmiştir. Nem, çatlak ve yetersiz ısı yalıtımı sonucu oluşan ısı kayıpları manuel olarak tespit edilmiştir [11]. O'Grady termal görüntü yardımıyla pencerelerde oluşan çoklu ısı köprülerinin etkileşimini incelemiştir. Çalışmada konumları ve boyutları önceden bilinen ısı köprülerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek tespit edilebilme başarısı ölçülmüştür [12]. Kim vd. gürültülü uygulamaların yoğunluğa dayalı uzamsal kümelenmesi yöntemi ile ısı kayıplarını sınıflandırmıştır. 134 termal görüntüden 151 ısı köprüsü ve 223 vaka manuel biçimde tespit edilerek YSA eğitilmiştir. Vaka çalışmalarında en iyi %89, en kötü %76 oranında doğruluk tespit edilmiştir [13]. Despotovic vd. bina ve mimari elemanların optik görüntüleri ve bina yaşı ile eğitilmiş YSA ile binanın ısıtma enerji gereksinimi tahmin edilmiştir. YSA'yı beslemek için 2898 görüntü eğitme, 387 görüntü doğrulama ve 580 görüntü test için kullanılmıştır. Analizlerde %60 civarında doğruluk elde edilmiştir [14].

Martinez vd. İHA üzerindeki termal kamera ile elde edilen görüntülerden cisimlerin yayınım değerinin 0,8 olduğu kabulü ile pencerelerden kaynaklanan ısı kayıplarını incelemiştir. Pencere kasaları ile istatistiksel model kurularak pencere camlarından kaynaklanan ısı kayıpları tahmin edilmiştir [15]. Arızalanan güneş paneli hücreleri işletim sistemi tarafından devre dışı bırakılır ve bu hücreler diğerlerinden daha fazla sıcaklığa sahip olur. Çevresine göre daha sıcak, fotovoltaik hücre büyüklüğünde ve şeklindeki bölgeler kenar belirleme tabanlı bir yöntemle belirlenmiştir [16]. Macher vd. lazer tarayıcısı ve termal kamera yerleştirilmiş kara aracı ile binaları tarayarak nokta bulutu elde etmiş ve düzlem oturtma algoritması ile ağaç, sokak lambası gibi bina önündeki cisimleri elemiştir. Histogram analizi ile eşik değeri belirlenip ısı köprüsü tayin edilmiştir [17]. Kakillioglu vd. İHA üzerine yerleştirilen kameradan elde edilen termal görüntüleri histogram analizi ile incelemiştir. Yer doğrusuna sahip 100 görüntü ile yapılan analizde en yüksek %42 doğruluk ve %78 geri çağırma başarısı elde edilmiştir [18]. Rakha vd. görüntünün histogramını 5 parçaya ayırarak en alt sınıfın ısı kaybı bölgesi olduğunu varsaymıştır. Eşik tayininde α ve β limit değerleri kullanıcı deneyimine bağlı olarak sırasıyla %10 ve %15 alınmıştır. 3D fotogrametrik yazılımı olan Pix4D ile 3D nokta bulutu elde edilmiştir [19]. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan başka bir çalışmada ise %76 doğruluk ve %74 geri çağırma başarısı elde edilmiştir [20].

Taylor vd. HEAT3 ısı transfer analiz yazılımını kullanarak manuel olarak elde edilen termal görüntüleri analiz ederek yapıların olması gereken yalıtım performanslarını ve mevcut ısı yalıtım performanslarını tespit etmiştir. Karşılaştırma ile işçilik veya uygulama hatası olup olmadığı belirlenmiştir [21]. Gonzalez vd. afin ölçek değişmez özellik dönüşümü algoritması ile termal görüntüleri Photomodeler Pro v6 yazılımını kullanarak georeferanslamasını yapmıştır. Görüntü işleme ile üst üste binen termal görüntülerin bina yüzeyine oturtulup ortotermal görüntülerinin oluşturulması sağlanmıştır [22]. Lai vd. cep telefonu ile elde edilen ve termal görüntüden bina içindeki kalorifer ve elektrikli ev aletlerinin uygun çalışma durumları incelemiştir [23]. Lewandowski vd. termal kamera ile binalardaki ısı kayıplarını laboratuvar koşullarında düşey ısıtma plakası kullanılarak ölçülmüştür [24].

Rakha vd. İHA ile elde edilen termal görüntülerin işlenmesinde kullanılan Agisoft Photoscan, Pix4D ve Drone Deploy yazılımlarını karşılaştırmış ve Drone Deploy yazılımının en kaliteli modeli orta düzeyde hesaplama süresi sonunda oluşturduğu tespit etmiştir [25]. Nikzad vd. tarihi yapılardaki ısı kaybı, nem ve küf oluşumunu termal görüntülerden manuel olarak belirlemiştir [26]. Ostanka bina dış yüzeyini termal görüntü ile ölçüp görüntüleri FLIR Reporter 8.5 yazılımı ile analiz etmiştir. Manuel olarak lento, balkon, duvar ve kat döşemeleri incelenmiş ve istatistiksel testler sonucunda tadilata ihtiyaç olup olmadığı kararını vermiştir [27]. Garrido vd. termal görüntüleri fotogrametrik denklemlerle en az 4 kontrol noktası kullanarak georeferanslamıştır. Termal yayınım katsayısının 0,95 olduğu kabul edilerek termal hesaplamalar yapılmıştır. Görüntü yatay ve dikey yönde tek boyutlu medyan filtre ile filtrelenmiştir. Yatay ve düşey doğrular aranmış ve termal geçirim değeri, sıcaklık farkı ve mekânsal inceleme ile ısı köprüsü sınıflandırması yapılmıştır [28].

YSA'ya ek olarak benirizasyon da sınıflandırma için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. White ve Rohrer taranmış belgelerdeki karakterleri tespit etmek için hareketli ortalama ve Entegre Fonksiyon Algoritması (EFA) olmak üzere 2 algoritma geliştirmiştir [29]. Chow ve Kaneko görüntünün kenar içeren bölgelerinde parlaklık düzeyinin çift modlu dağılım, kenar içermeyen bölgelerinde ise tek modlu dağılım göstereceği varsayımı ile kenar belirleme yapmıştır. Çift modlu dağılım gösteren bölgelerde en düşük kareler yöntemi ile model parametrelerini belirleyerek eşik değer tayin etmiş ve kalp görüntülerinin benirizasyonunu yapmıştır [30]. Taxt vd. histogram tabanlı eşik belirleme ile benirizasyon yapmış ve eğitimli sınıflandırma ile daha iyi sonuç elde etmiştir [31]. Mardia ve Hainsworth görüntünün nesne ve arka plandan oluştuğu kabulü ile her iki bölgenin normal dağılıma uygun ortalama ve varyans değerlerine sahip olacağını varsayarak istatistiksel yöntemlerle eşik değeri belirlemiştir.

FIKRİ GÖRÜNÜM

Mekânsal korelasyon oluşturmak için değeri deneme yanılma ile belirlenen β katsayısı kullanılmıştır [32]. Parker görüntü boyunca ışık şiddetinin aynı olmamasından etkilenmemesi için görüntüyü NxN adet alt görüntüye bölmüştür. Alt bölgenin ortalama değerine alt bölgenin üç standart sapma değerini ekleyerek alt bölgede geçerli eşik değerini belirlemiş ve sınıflandırma yapmıştır [33]. Yanowitz ve Bruckstein görüntü üzerinde parlaklık değeri büyük değişiklik gösteren kenar noktalarından oluşan yüzey modeli kurmuş ve bir eşik değer yüzeyi tanımlayarak nesne tanımlaması yapmıştır [34].

Trier vd. optik karakter tanımlaması için kontur profili, alanlama, Spline eğrileri yaklaşımı, eliptik Fourier serileri yaklaşımı, Zernike Momenti ve Karhuenen-Loeve transformasyonu yöntemlerini incelemiş ve Fourier transformasyonu ile yazı dönüklüğünün olumsuz etkisinin ortadan kalktığını belirtmiştir [35]. Cheriet vd. ayırt edilirlik faktörü olarak tanımlanan sınıf arası varyans değeri 0,95'ten büyük olana kadar Otsu Algoritmasını uygulayıp elde edilen eşik değerinden görüntü üzerinde yakınsamalı olarak sınıflandırma yapmıştır. Sınıflandırılmayan kısma Otsu algoritması tekrar uygulanıp ayırt edilebilirlik faktörü 0,95'in üzerine çıkana kadar görüntü üzerinde sınıflandırma işlemini sürdürmüştür. İyileştirilmiş Otsu algoritması banka çeklerindeki el yazılarının tanımlanmasında kullanılmıştır [36].

Bradley ve Roth benirizasyon işleminin hesap yükünü düşürmek için görüntünün toplanmış alan tablosunu oluşturarak adaptif eşikleme yapmıştır. Uygulanan yöntem hareketli ortalama ilkelerine dayanmakla birlikte yapılan iyileştirmelerle tarama yönünden bağımsız biçimde sonuç elde edilmesi sağlanmıştır. Görüntü elemanının parlaklık değerini komşu elemanların ortalaması ile karşılaştırarak güçlü kontrasta sahip kenarları koruyup, zayıf kontrasta sahip kenarları eleyerek sonuç almaktadır [37]. Sezgin ve Sankur histogram, sınıflandırma, entropi, öznitelik benzerliği, konumsal eşikleme ve yerel uyarlamalı eşikleme yöntemlerinden oluşan 40 yöntemi hasarsız test görüntüleri ve metin belgesi görüntüleri üzerinde deneyerek karşılaştırmış [38], Kitler ve Illingworth [39,40] tarafından önerilen sınıflandırma tabanlı algoritmanın en iyi sonucu verdiğini belirlemişlerdir. Shafait [41] çok fazla hesap yükü gerektiren Sauvola ve Pietikainen [42] tarafından geliştirilen yerel uyarlamalı benirizasyon yönteminin hesap yükünü toplam tabloları ile önemli ölçüde azaltmıştır. Görüntü üzerinde gezinen maske içindeki görüntü elemanlarının ortalama ve standart sapmasının hesaplanması için hem piksel değerlerinin hem de karelerinin toplam tablolarını oluşturmuştur. Bu sayede algoritmanın hesap karmaşıklığı önemli ölçüde azalmış fakat kareler toplamı hesaplanırken büyük görüntüler için 32 bit veri formatında değer aşımı hatasının görülme riski oluşmuştur. Su vd. yerel kontrast hesaplanmasında görüntünün parlaklık değerinin ışıktan etkilenmesinin en aza indirilmesi için yerel kontrast değerini normalleştirmiş ve yerel kontrast değerlerinin ağırlıklı ortalamasını alarak eşik değerini belirlemiştir [43].

Trier ve Taxt 11 yerel ve 4 küresel benirizasyon yöntemini karşılaştırarak Yanowitz ve Bruckstein [34] tarafından önerilen yöntemin en iyi sonucu verdiğini belirlemiştir [44]. Karşılaştırmada yer doğrusu mevcut olmadığı için çizgilerin kırık olmaması, çizgilerin bulanıklaşmaması, nesnelerin kaybolmaması ve homojen alanlarda gürültü olmaması kriterleri ele alınmıştır. Trier ve Jain [45] 11 yerel ve 4 küresel yöntemi karşılaştırmış ve Niblack tarafından önerilen yöntemin en iyi sonucu verdiğini belirlemiştir [46].

Balaha vd. el yazısı Arapça metinleri tanımlayan çalışmaların taramasını yapmış ve YSA, Makine Öğrenmesi ve Destek Vektör Makinesinin öne çıkan yöntemler olduğunu belirtmiştir [47]. Kang vd. iç içe geçmiş modüler U-Ağlarını önceden eğiterek benirizasyon ile metin tanımlamıştır [48]. Bhowmik vd. görüntülerin benirizasyonunda nesne ve arka plan kararı verirken oyun teorisinden esinlenerek hatalı sınıflandırmayı kayıp, doğru sınıflandırmayı kazanç olarak puanlayan bir algoritma oluşturmuş ve en yüksek puanı kazanacak şekilde benirizasyonu gerçekleştirmiştir [49]. Qureshi vd. hiperspektral görüntülerin metin tarama işlemlerini incelemiş, kızıltötesi ve morötesi bandlarda gerçekleştirilen analizlerle mürekkebin daha başarılı biçimde tespit edildiğini belirtmiştir. Fakat hiperspektral analizin çok pahalı olması ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerin uygulanabilmesi için yeterli büyüklükte belge veritabanının olmaması yöntemin yaygınlaşmasını engellemektedir [50]. Bettemir termal görüntüler üzerinde ısı kayıplarının belirlenmesi için Bernsen, medyan ve ortalama eşik yöntemlerini karşılaştırmış ve Bernsen'in daha başarılı sonuç verdiğini tespit etmiştir [51].

Cheremkhin ve Kurbatova hologram görüntülerinin benirizasyonu için Ridler-Caluard, Kittler-Illingworth, Otsu ve Li tarafından önerilen entropi tabanlı yöntemlerin en iyi sonucu verdiğini belirtmiştir [52]. Cheremkhin vd. yerel eşikleme, Blok bölme ve hata difüzyonu yöntemleri ile hologram benirizasyonu yapmıştır. Çalışmada beş yerel ve beş küresel eşikleme yöntemi, beş standart ve beş hata difüzyonu tabanlı yöntem ile kendi önerdikleri ağırlık matrislerine göre eşikleme yapan 12 adet yöntemi karşılaştırmıştır. En iyi sonucu 5x7 boyutunda kendi geliştirdikleri maske ile elde etmişlerdir [53]. Uçkan vd. (2021) Türkçe karakterlerin sınıflandırılması için spektral cümle sınıflandırması algoritmasını geliştirmiştir [54]. Maskeli Bölgesel Evrişimsel Sinir Ağları (M-BESA) kullanılarak plaka tanıma sistemi geliştirilmiştir [55].

Literatür taramasında yer alan çalışmalar çok sayıda termal görüntü ile eğitilen yapay sinir ağları ile ısı kayıplarının belirlenmesini içermektedir. Çok sayıda yer doğrusunun hazırlanmasını gerektiren YSA'nın oluşturulması önemli bir iş gücü ve maliyet gerektireceği için tüm denetim firmalarının bu yöntemi

İNCELEME ÖRNEĞİDİR

uygulayabilmesi mümkün olmayabilecektir. Görüntülerin örtüşen kısımlarının SLAM (simultaneous localization and mapping) ve benzeri algoritmaların kullanımıyla 3B model oluşturan çalışmalar ise gelişmiş yazılımlar ve yer kontrol noktaları kullanmaktadır. Belirtilen durum hem maliyeti arttırmakta hem de ölçüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Isı geçirim katsayısının tahmini için ısı akışını ölçen sensörler ve termal görüntüler birlikte kullanılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen ölçümler daha yüksek doğruluğa sahip olmakla birlikte daha fazla sensöre ihtiyaç duyulduğu için muayene süresini ve maliyetini arttırmaktadır. Literatür taramasında incelenen yöntemlerin uygulanması yüksek maliyetli olduğu için bu çalışmada daha hızlı ve ekonomik bir yöntem olan eşik tabanlı benirizasyon ile ısı kayıplarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen kullanıcı müdahalesi olmadan ısı kaybı sınıflandırması yapan yöntem bu çalışmanın literatüre katkısı olacaktır.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada dışarıdan hiçbir insan müdahalesi olmadan eşik değerini belirleyerek ısı kayıplarının belirlenebileceği yöntemler üzerinde çalışılmıştır. Literatürden derlenen Roberts, Sobel, Prewitt, Robinson, Kirsch, Frei-Chen ile Frei-Chen üzerinde yapılan modifikasyonlar, Laplace ve Kenny kenar belirleme operatörleri ile EFA'nın termal görüntü üzerindeki performansı incelenmiştir. Yöntemlerin içerdiği maskeler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Uygulanan kenar belirleme operatörleri (Implemented edge detection operators)

Yöntem Adı	Maske	Kenar Büyüklüğü
Roberts Kenar Belirleme Operatörü [56]	$R_1=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}\quad R_2=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{bmatrix}$	$M_1=\sqrt{R_1^2+R_2^2}$, $M_2=\lvert R_1\rvert+\lvert R_2\rvert$
Sobel Kenar Belirleme Operatörü [57]	$S_1=\begin{bmatrix}-1 & -2 & -1\\ 0 & 0 & 0\\ 1 & 2 & 1\end{bmatrix}\quad S_2=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1\\ -2 & 0 & 2\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}$	$M_S=\sqrt{S_1^2+S_2^2}$
Prewitt Kenar Belirleme Operatörü [58]	$P_1=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -2 & 1\\ -1 & -1 & -1\end{bmatrix}\ P_2=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -2 & -1\\ 1 & -1 & -1\end{bmatrix}\ P_3=\begin{bmatrix}1 & 1 & -1\\ 1 & -2 & -1\\ 1 & 1 & -1\end{bmatrix}\ P_4=\begin{bmatrix}1 & -1 & -1\\ 1 & -2 & -1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$ $P_5=\begin{bmatrix}-1 & -1 & -1\\ 1 & -2 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\ P_6=\begin{bmatrix}-1 & -1 & 1\\ -1 & -2 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\ P_7=\begin{bmatrix}-1 & 1 & 1\\ -1 & -2 & 1\\ -1 & 1 & 1\end{bmatrix}\ P_8=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ -1 & -2 & 1\\ -1 & -1 & 1\end{bmatrix}$	$M_P=MAK\left(\sum_{i=1}^{8}P_i\right)$
Robinson Kenar Belirleme Operatörü [59]	$R_W=\begin{bmatrix}1 & 2 & 1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & -2 & -1\end{bmatrix}\ R_{NW}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 2\\ -1 & 0 & 1\\ -2 & -1 & 0\end{bmatrix}\ R_N=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1\\ -2 & 0 & 2\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}\ R_{NE}=\begin{bmatrix}-2 & -1 & 0\\ -1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 2\end{bmatrix}$ $R_E=\begin{bmatrix}-1 & -2 & -1\\ 0 & 0 & 0\\ 1 & 2 & 1\end{bmatrix}\ R_{SE}=\begin{bmatrix}0 & -1 & -2\\ 1 & 0 & -1\\ 2 & 1 & 0\end{bmatrix}\ R_S=\begin{bmatrix}1 & 0 & -1\\ 2 & 0 & -2\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}\ R_{SW}=\begin{bmatrix}2 & 1 & 0\\ 1 & 0 & -1\\ 0 & -1 & -2\end{bmatrix}$	$M_R=MAK\left(\sum_{i=1}^{8}R_i\right)$
Kirsch Kenar Belirleme Operatörü [60]	$K_1=\begin{bmatrix}-3 & -3 & 5\\ -3 & 0 & 5\\ -3 & -3 & 5\end{bmatrix}\ K_2=\begin{bmatrix}-3 & 5 & 5\\ -3 & 0 & 5\\ -3 & -3 & -3\end{bmatrix}\ K_3=\begin{bmatrix}5 & 5 & 5\\ -3 & 0 & -3\\ -3 & -3 & -3\end{bmatrix}\ K_4=\begin{bmatrix}5 & 5 & -3\\ 5 & 0 & -3\\ -3 & -3 & -3\end{bmatrix}$ $K_5=\begin{bmatrix}5 & -3 & -3\\ 5 & 0 & -3\\ 5 & -3 & -3\end{bmatrix}\ K_6=\begin{bmatrix}-3 & -3 & -3\\ 5 & 0 & -3\\ 5 & 5 & -3\end{bmatrix}\ K_7=\begin{bmatrix}-3 & -3 & -3\\ -3 & 0 & -3\\ 5 & 5 & 5\end{bmatrix}\ K_8=\begin{bmatrix}-3 & -3 & -3\\ -3 & 0 & 5\\ -3 & 5 & 5\end{bmatrix}$	$M_K=MAK\left(\sum_{i=1}^{8}K_i\right)$
Frei-Chen Kenar Belirleme Operatörü [61]	$W_1=\begin{bmatrix}1 & \sqrt{2} & 1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & -\sqrt{2} & -1\end{bmatrix}\ W_2=\begin{bmatrix}1 & 0 & -1\\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2}\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}\ W_3=\begin{bmatrix}0 & -1 & \sqrt{2}\\ 1 & 0 & -1\\ -\sqrt{2} & 1 & 0\end{bmatrix}\ W_4=\begin{bmatrix}\sqrt{2} & -1 & 0\\ -1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & -\sqrt{2}\end{bmatrix}$ $W_5=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ -1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\ W_6=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}\ W_7=\begin{bmatrix}1 & -2 & 1\\ -2 & 4 & -2\\ 1 & -2 & 1\end{bmatrix}\ W_8=\begin{bmatrix}-2 & 1 & -2\\ 1 & 4 & 1\\ -2 & 1 & -2\end{bmatrix}\ W_9=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$	$e=\dfrac{\left(\sum_{i=1}^{4}R_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^{9}R_i\right)}$
Modifiye Frei-Chen Kenar Belirleme Operatörü [62]	$A_X=\begin{bmatrix}1 & 0 & -1\\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2}\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}\ A_Y=\begin{bmatrix}1 & \sqrt{2} & 1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & -\sqrt{2} & -1\end{bmatrix}\ A_{45}=\begin{bmatrix}\sqrt{2} & -1 & 0\\ -1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & -\sqrt{2}\end{bmatrix}\ A_{135}=\begin{bmatrix}0 & 1 & -\sqrt{2}\\ -1 & 0 & 1\\ \sqrt{2} & -1 & 0\end{bmatrix}$	$A=\sqrt{\dfrac{1}{2\sqrt{2}}\left[A_X^2+A_Y^2+A_{45}^2+A_{135}^2\right]}$

Çizelge 1. (Devam (continued))

ERKEN GÖRÜNÜM

Yöntem Adı	Maske	Kenar Büyüklüğü
Modifiye Frei-Chen Kenar Belirleme Operatörü II [63]	$R_V=\begin{bmatrix}-1&-1&-1\\3&0&3\\-1&-1&-1\end{bmatrix}\ R_{LD}=\begin{bmatrix}-1&-1&3\\-1&0&-1\\3&-1&-1\end{bmatrix}\ R_H=\begin{bmatrix}-1&3&-1\\-1&0&-1\\-1&3&-1\end{bmatrix}\ R_{RD}=\begin{bmatrix}3&-1&-1\\-1&0&-1\\-1&-1&3\end{bmatrix}$	$R=\sqrt{\frac{1}{12}\left[R_V^2+R_{LD}^2+R_H^2+R_{RD}^2\right]}$
Laplace Kenar Belirleme Algoritması [64]	$L_X=\begin{bmatrix}0&-1&0\\-1&4&-1\\0&-1&0\end{bmatrix}\quad L_Y=\begin{bmatrix}-1&-1&-1\\-1&8&-1\\-1&-1&-1\end{bmatrix}$	$L=MAK\left(\lvert L_X\rvert,\lvert L_Y\rvert\right)$
İkinci Dereceden Laplace Kenar Belirleme Algoritması [65]	$G=\frac{1}{8}\begin{bmatrix}0&1&0&1&0\\1&4&8&4&1\\0&8&-56&8&0\\1&4&8&4&1\\0&1&0&1&0\end{bmatrix}$	
Entegre Fonksiyon Algoritması [29, 66]	$A(i,j)=\sum_{n=-1,0,1}\sum_{m=-1,,0,1}a(i+n,j+m)$ $a(i,j),\lvert u(i-1,j)-u(i+1,j)\rvert+\lvert u(i,j-1)-u(i+1,j)\rvert$ $ddxy(i,j)=u(i+2,j)+u(i-2,j)+u(i,j+2)+u(i,j-2)-4u(i,j)$	$S(i,j)=\begin{cases}0 & eger\quad A(i,j)<T\\ - & eger\quad A(i,j)\geq T\ ve\ ddxt(i,j)<0\\ + & eger\quad A(i,j)\geq T\ ve\ ddxt(i,j)\geq 0\end{cases}$ +- " ile "-+" örüntüsü arasında ısı kaybı aranmıştır

Çizelge 1'de hesaplanan kenar büyüklük değerleri Otsu eşik belirleme algoritması ile elde edilen eşik değeri ile karşılaştırılarak görüntü elemanının ısı kayıp bölgesini temsil edip etmediği belirlenir.

3.1 Otsu Eşik Belirleme Algoritması (Otsu Thresholding Algorithm)

Otsu tarafından geliştirilen yöntem görüntüyü arka plan ve incelenen nesne olarak 2 sınıfa ayırmak için bir eşik değeri belirlemeyi amaçlamaktadır. Yöntem, arka plan ve nesneyi oluşturan görüntü değerlerinin ortalamasını maksimum yapan eşiği arar. Görüntüde L adet gri seviye varsa ve i'ninci parlaklık seviyesindeki görüntü elemanlarının sayısı n_1, n_2, …, n_L ise i = [1,2,3,..,L] olabilir ve $n_1 + n_2 + \ldots + n_L = N$ olur. N görüntüyü oluşturan görüntü elemanı sayısıdır. Bir görüntü elemanının i'ninci parlaklık seviyesinde olma olasılığı $P_i=\frac{n_i}{N}$ ile ifade edilir. Eşik değerinin k sayısına eşit olduğu durumda S_0 sınıfına [1, 2 , …, k], S_1 sınıfına [k+1, …, L-1, L] değerini alan görüntü elemanları dahil olur. Bir görüntü elemanının S_0 ve S_1 sınıflarına ait olma olasılığı Eşitlik 1'de sunulmuştur [69].

$$w_0=\Pr(S_0)=\sum_{i=1}^{k}P_i=w(k),\ w_1=\Pr(S_1)=\sum_{i=k+1}^{L}P_i=1-w(k) \quad (1)$$

Eşitlik 1'de w_0 görüntüdeki herhangi bir pikselin 1 ile k sayısı arasında parlaklık değerine sahip olma olasılığını ifade etmektedir. Bu değer ilgili pikselin S_0 sınıfına ait olma olasılığıdır. Sınıfa dâhil olan görüntü elemanlarının ortalaması Eşitlik 2'de sunulmuştur.

$$\mu_0=\sum_{i=1}^{k}\left(i*\Pr(i\mid S_0)\right)=\sum_{i=1}^{k}\left(i*\frac{P_i}{w_0}\right)=\frac{\mu(k)}{w(k)} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de $\mu(k)$, $\sum_{i=1}^{k} i*P_i$ ifadesi ile $w(k)$, $\sum_{i=1}^{k}P_i$ ifadesi ile S_1 sınıfının ortalama değeri $\mu_1=\sum_{i=1+k}^{L}\left(i*\Pr(i\mid S_1)\right)=\sum_{i=k+1}^{L}\left(i*\frac{P_i}{w_1}\right)=\frac{\mu_T-\mu(k)}{1-w(k)}$ ifadesi ile hesaplanır. Denklemde μ_T için $\mu_T=\mu(L)=\sum_{i=1}^{L}i*P_i$ eşitliği geçerlidir. S_0 sınıfının varyansı Eşitlik 3 ile hesaplanır.

$$\sigma_0^2=\sum_{i=1}^{k}(1-\mu_0)^2\Pr(i\mid S_0)=\sum_{i=1}^{k}(1-\mu_0)^2\frac{P_i}{w_0} \quad (3)$$

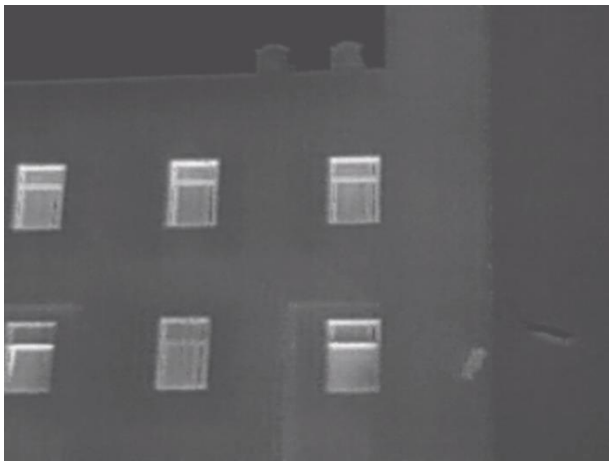
S_1 sınıfının varyansı $\sigma_1^2=\sum_{i=k+1}^{L}(1-\mu_1)^2\frac{P_i}{w_1}$ ifadesi ile hesaplanır. Değeri maksimum yapılmak istenen iki sınıf arasındaki varyans farkı ise Eşitlik 4'de sunulan ifade ile hesaplanır.

$$\sigma_B^2(k)=\frac{[\mu_T w(k)-\mu(k)]^2}{w(k)[1-w(k)]} \quad (4)$$

4. VAKA ANALİZLERİ (CASE STUDIES)

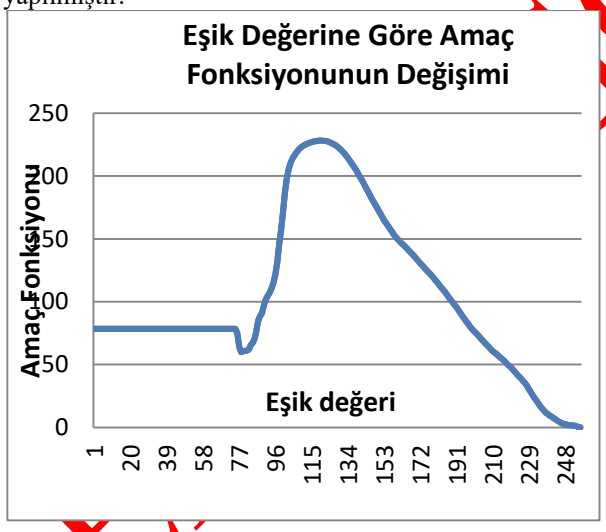
Belirtilen yöntemlerin uygulanabilmesi için 27 Kasım 2018 günü saat 19:50 sularında 4 ^{0}C hava sıcaklığında İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi E ve F bloklarının kuzey, doğu ve batı cephelerinin Şekil 1 ve 18'de gösterilen termal görüntüleri FLIR marka termal kamera ile alınmıştır. Görüntü alınırken iç ortam kalorifer ile ısıtılmaktaydı ve iç ortam sıcaklığı 22 ila 23 ^{0}C arasında değişmekteydi. Binaların dış cephesi mantolama ile ısı yalıtımlıdır. Görüntüler 256x336 boyutunda ve 8 bit spektral genişliğe sahiptir. Uygulanan yöntemlerin ara sonuçlarının detaylı olarak sunulduğu E Bloğun batı cephesine ait termal görüntü Şekil 1'de sunulmuştur. E Blok kuzey cephe ile F Blok kuzey ve doğu cephelerine ait termal görüntüler ve görüntülerin analiz sonuçları Şekil 18'de sunulmuştur.

ERKEN GÖRÜNÜM



Şekil 1. E Blok batı cephesinin termal görüntüsü. (Thermal image of the west façade of the E Blok)

Termal görüntü üzerinden ısı kayıplarının tespiti için gereken eşik değerinin hesaplanması için önce Otsu algoritması uygulanmıştır. Amaç fonksiyonunun maksimum değeri *k* değişkenine 1'den 255'e kadar değer verilerek Eşitlik 1-4 hesaplanarak elde edilmiştir. Atanan *k* değerine göre Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanan amaç fonksiyonunun değişimi Şekil 2'deki grafikte gösterilmiştir. En yüksek değer 228,0639 ile 119 parlaklık değeri için elde edilmiştir. Bu nedenle örnek görüntünün eşik değeri 119 alınarak benirizasyon yapılmıştır.



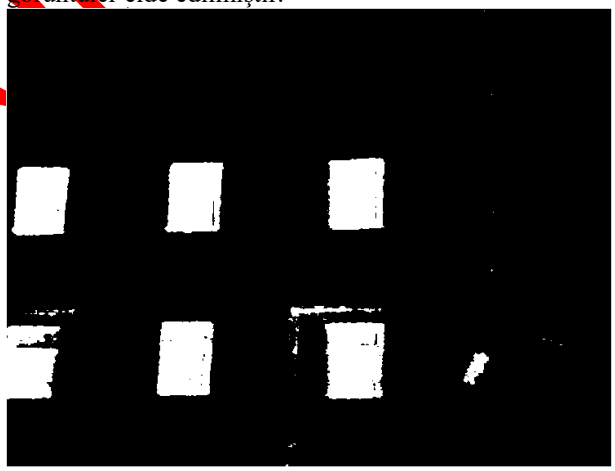
Şekil 2. Sınıflandırma eşiğine göre amaç fonksiyonunun değeri. *(The object function with respect to the classification threshold value)*

Elde edilen eşik değeri kullanılarak benirizasyon yapılmış ve sonucu Şekil 3'te sunulmuştur.



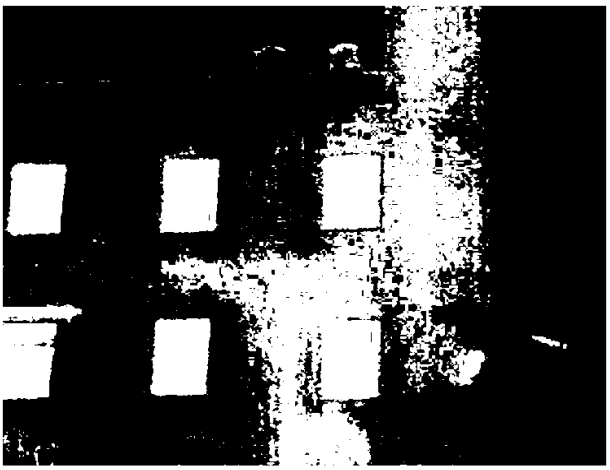
Şekil 3. Otsu eşiği kullanılarak elde edilen sonuç. (*Obtained result by the Otsu threshold*)

Şekil 3'te sunulan görüntüde sadece pencereler ısı kaybı bölgeleri olarak tespit edilmiştir. Binanın dış cephesinde bulunan güvenlik kamerasının bir kısmı yaydığı ısı nedeniyle ısı kaybı bölgesi olarak sınıflandırılmıştır. Binanın dış cephesinin herhangi bir kısmı ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanmamıştır. Isı kaybına yol açan daha fazla yapı elemanının tanımlanabilmesi için Otsu eşiği sırası ile 0,9 ve 0,8 değerleri ile çarpılarak benirizasyon yapılmış ve Şekil 4 ve 5'te sunulan görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 4. Otsu eşiğinin 0.9 ile çarpılması ile kullanılarak yapılan benirizasyon. (*Binarization implemented by multiplying the Otsu threshold by 0.9)*

Eşik değerinin düşürülmesi sonucunda daha fazla bölge ısı kaybı noktası olarak tanımlanmıştır. Eşik değerinin 0,9 ile çarpılması sonucunda binanın duvar dişinden kaynaklanan ısı kaybı tespit edilebilmiştir. Eşik değerinin 0,8 ile çarpılmasıyla bina kenarı ve binanın ön cephesi ile yan cephesinin bazı kısımları ısı kaybı noktası olarak tanımlanmıştır. Pencerelerdeki ısı kaybı bina cephesine göre çok yoğun olduğu için doğrudan görüntü elemanlarının parlaklık değeriyle hesaplanan Otsu eşiği ile yapılan sınıflandırmada pencere dışındaki bölgelerin tanımlanması oldukça güçtür.



Şekil 5. Otsu eşiğinin 0.8 ile çarpılması ile kullanılarak yapılan benirizasyon. (*Binarization implemented by multiplying the Otsu threshold by 0.8*)

Eşik değerindeki ufak değişimlerle sınıflandırmada önemli farklılıkların olması sınıflandırma sonucunun eşik değerindeki uyarlamalara çok duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle doğrudan termal görüntü yerine termal görüntüden elde edilen kenar görüntüsü üzerinde sınıflandırmanın yapılması tercih edilmiştir. Termal görüntüye kenar belirleme operatörünün uygulanması ile elde edilen kenar görüntüsüne Eşitlik 1-4, *k* değişkenine 1'den 255'e kadar değer verilerek uygulanır ve Eşitlik 4'ün en yüksek değeri almasını sağlayan k değeri Otsu eşiği olarak tanımlanır.

4.1. Roberts Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Robert Edge Detection Operator)

Roberts kenar belirleme operatörü ile Şekil 6'da sunulan görüntüler elde edilmiştir.



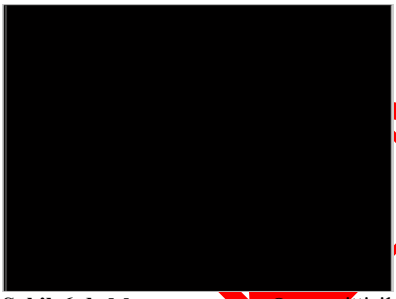
Şekil 6.a. M_1 operatörünün sonucu. (Result of M_1 operator)



Şekil 6.b. M_2 operatörünün sonucu. (Result of M_2 operator)



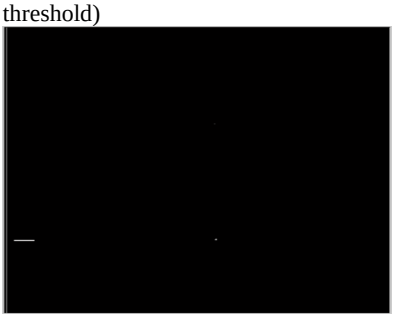
Şekil 6.c. M_1 operatörüne Otsu eşiği ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_1 operator with the Otsu threshold)



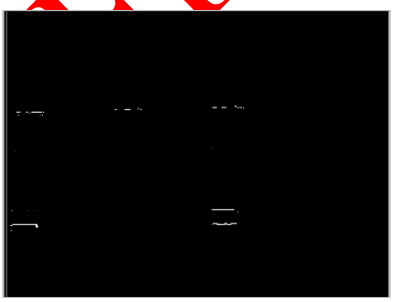
Şekil 6.d. M_2 operatörüne Otsu eşiği ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_2 operator with the Otsu threshold)



Şekil 6.e. M_1 operatörüne Otsu eşiğinin yarısı ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_1 operator with the half of the Otsu threshold)



Şekil 6.f. M_2 operatörüne Otsu eşiğinin yarısı ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_2 operator with the half of the Otsu threshold)



Şekil 6.g. M_1 operatörüne Otsu eşiğinin çeyreği ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_1 operator with the quarter of the Otsu threshold)

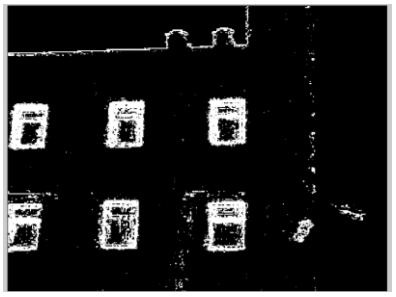


Şekil 6.h. M_2 operatörüne Otsu eşiğinin çeyreği ile benirizasyon sonucu. (Result of binarization of M_2 operator with the quarter of the Otsu threshold)

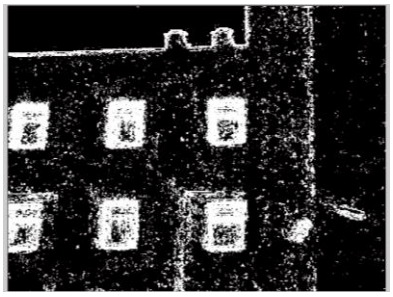


Şekil 6.i. M_1 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_1)

Şekil 6. (Devam (continued))



Şekil 6.j. M_1 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_1)



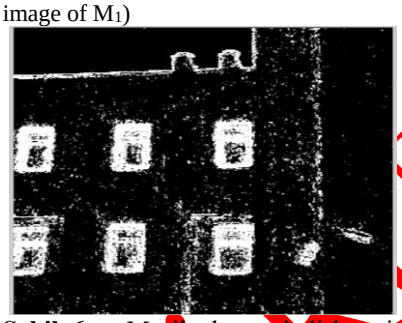
Şekil 6.k. M_1 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_1)



Şekil 6.l. M_2 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_2)



Şekil 6.m. M_2 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_2)



Şekil 6.n. M_2 ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of M_2)

Mutlak değer ile kenar büyüklüğü belirleyen operatör daha keskin kenar sunmaktadır (Şekil 6.a ve b). Otsu eşiği çok yüksek olduğu için her 2 yöntemde de sadece pencereler belirlenip, bina kenarları net biçimde belirlenememiştir. Otsu eşiğinin çeyreği kullanıldığında mutlak değer ile hesaplanan eşik büyüklüğü ısı kayıplarını daha yüksek oranda belirleyebilmiştir. Fakat ısı kayıp bölgeleri çok düşük oranda belirlenebilmiştir (Şekil 6. c, d, e, f, g, h).

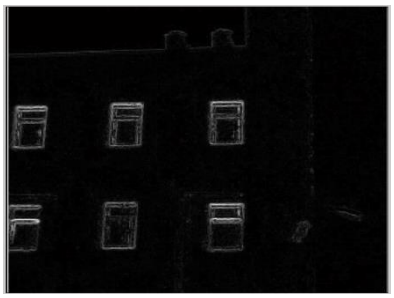
Kareler toplamıyla elde edilen kenar belirleme görüntüsüne uygulanan Otsu algoritması sonucunda eşik değeri 8 hesaplanmıştır. Elde edilen eşik değerinin uygulanması sonucu pencerelerde oluşan ısı kaybı yoğun biçimde, bina kenarları ise zayıf olarak belirlenebilmiştir. Eşik değerinin yarısı uygulandığında pencerelerdeki ısı kaybı belirlenmiş ve bina ile dış ortam sıcaklığının farklı olması sonucu oluşan ısı kaybı da tespit edilebilmiştir. Ayrıca güvenlik kameralarının sıcaklığından kaynaklanan kenarlar da ısı kaybı olarak tanımlanmıştır. Buna ek olarak duvar dişinden kaynaklanan ısı kayıpları da tespit edilmiştir. Eşik değerinin çeyreği alındığında bina yüzeyindeki birçok nokta ısı kaybı olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.ı, j, k).

Mutlak değer operatörünün kenar görüntüsü üzerinden hesaplanan eşik değeri 12 olarak belirlenmiştir. Bu değer ile yapılan benirizasyonda pencerelerden kaynaklanan ısı kaybı güçlü, bina kenarı ise zayıf biçimde belirlenmiştir. Eşik değerin yarısı ve çeyreği ile yapılan benirizasyon işlemleri kareler toplamı operatörü ile çok yakın sonuçlar sunmakla birlikte daha az sayıda görüntü elemanını ısı kaybı bölgesi olarak sınıflandırmıştır (Şekil 6. l, m, n).

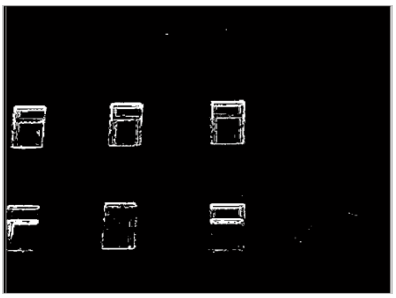
4.2. Sobel Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Sobel Edge Detection Operator)

Sobel kenar belirleme operatörü ile Şekil 7'de sunulan kenar görüntüleri elde edilmiştir.

ERKEN GÖRÜNÜM



Şekil 7.a. Sobel operatörü kenar büyüklüğü görüntüsü. / (Edge magnitude image of the Sobel operatör)



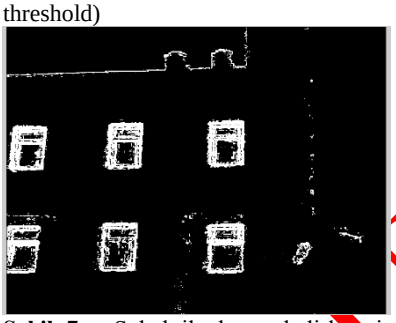
Şekil 7.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması ile elde edilen benirizasyon sonucu (Binarization obtained by the half of the Otsu threshold)



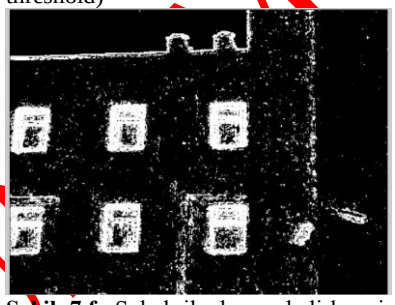
Şekil 7.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması ile elde edilen benirizasyon sonucu (Binarization obtained by the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 7.d. Sobel ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Sobel)



Şekil 7.e. Sobel ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Sobel)



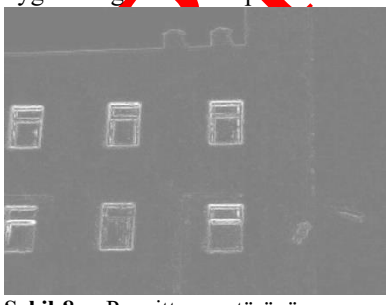
Şekil 7.f. Sobel ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Sobel)

Sobel kenar belirleme operatörü yüksek katsayılı maskesi sayesinde hem pencereleri hem de bina kenarını belirlemiştir (Şekil 7.a). Otsu algoritmasıyla belirlenen eşik değerinin yarısının uygulanması sonucunda pencerelerden oluşan ısı kaybı belirlenebilmiştir (Şekil 7.b). Eşik değerinin çeyreği uygulandığında bina kenarı zayıf biçimde tespit edilebilmiştir (Şekil 7.c).

Kenar görüntüsüne uygulanan Otsu algoritması ile eşik değeri 43 olarak hesaplanmıştır. Bu değer uygulandığında pencerelerden kaynaklanan ısı kaybı tespit edilmiştir (Şekil 7.d). Eşik değerin yarısının uygulandığı durumda pencerelerdeki ısı kaybı daha net belirlenirken bina kenarı ve duvar dışından kaynaklanan ısı kaybı zayıf biçimde tespit edilmiştir (Şekil 7.e). Eşik değerinin çeyreği uygulandığında bina kenarı güçlü biçimde belirlenmiş ve bina yüzeyindeki çok sayıda nokta ısı kaybı noktası olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.f).

4.3 Prewitt Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Prewitt Edge Detection Operator)

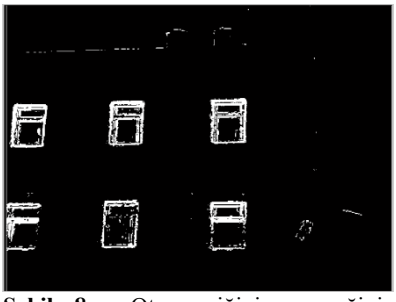
Prewitt kenar belirleme operatörü uygulandığında Şekil 8'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 8.a. Prewitt operatörünün sonucu. (Result of Prewitt operator)



Şekil 8.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



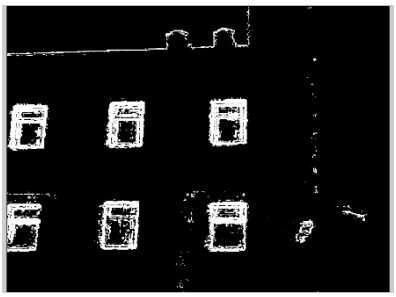
Şekil 8.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)

ÖRNEKTİR

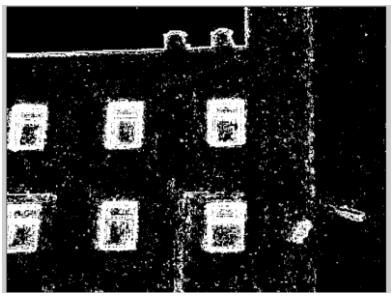
Şekil 8. (Devam (continued))



Şekil 8.d. Prewitt ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Prewitt)



Şekil 8.e. Prewitt ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Prewitt)



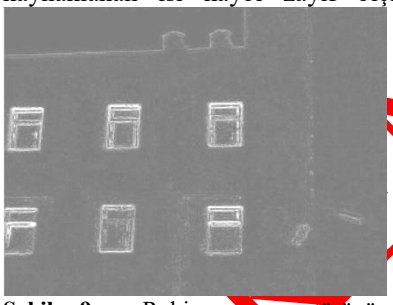
Şekil 8.f. Prewitt ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Prewitt)

8 farklı yönde oluşturulan maskeler sayesinde bina kenarları ve pencereler başarılı biçimde belirlenmiştir (Şekil 8.a). Görüntü üzerinden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin kullanılması sonucu ısı kayıplarının olduğu bölgeler tespit edilmiştir (Şekil 8.c). Bina dış cephesi üzerine monte edilen güvenlik kameraları ve bina dış cephesinin büyük bir kısmı belirlenmiştir.

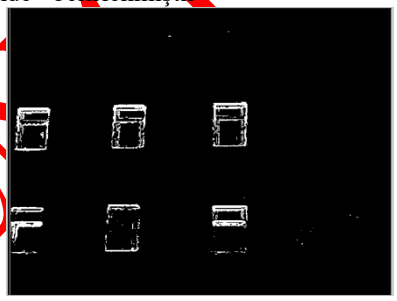
Prewitt operatörü ile elde edilen kenar görüntüsüne Otsu Algoritması uygulandığında eşik değeri 32 olarak hesaplanmıştır. Bu değer uygulandığında sadece pencerelerdeki ısı kaybı belirlenebilmiş, bina kenarı zayıf biçimde tespit edilebilmiştir (Şekil 8.d). Eşik değerin yarısı uygulandığında pencereler ve bina kenarı daha keskin biçimde belirlenirken duvar dışından kaynaklanan ısı kaybı zayıf biçimde belirlenmiştir (Şekil 8.e). Eşik değerinin çeyreği ile benirizasyon yapıldığında pencerelerdeki ısı kaybı ve bina kenarları daha vurgulu biçimde belirlenmiştir (Şekil 8.f). Ayrıca bina yüzeyinde çok sayıda ısı kaybı olarak tanımlanan nokta oluşmuştur. Kenar görüntüsü ile termal görüntü karşılaştırıldığında kenar görüntüsünden ısı kayıplarının daha başarılı biçimde belirlendiği görülmektedir.

4.4 Robinson Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Robinson Edge Detection Operator)

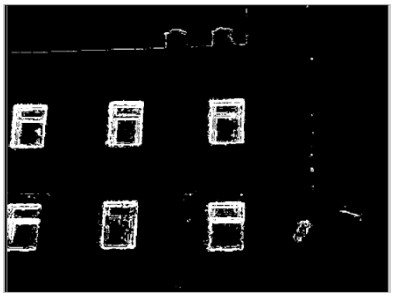
Robinson kenar belirleme operatörü ile elde edilen sonuçlar Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9.a. Robinson operatörünün sonucu. (Result of Robinson operator)



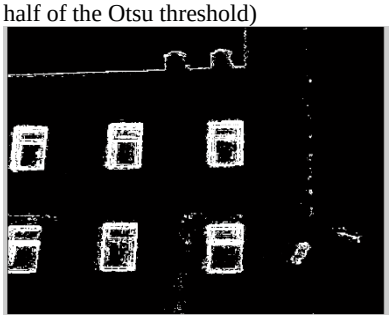
Şekil 9.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



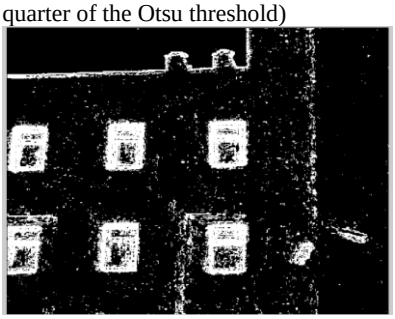
Şekil 9.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 9.d. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image)



Şekil 9.e. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image)



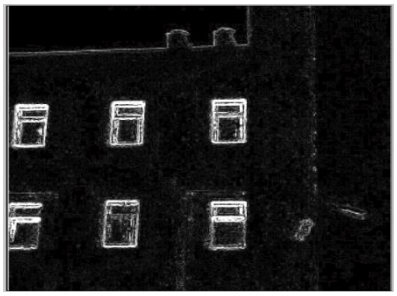
Şekil 9.f. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image)

REVİZYONLUM

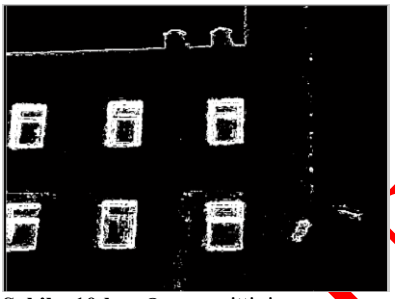
Robinson operatörü bina kenarlarını ve pencereleri Şekil 9.a'da sunulduğu üzere belirlemektedir. Otsu algoritması ile termal görüntüden elde edilen eşik değeri kullanıldığında ısı kayıplarının çok düşük bir kısmı tespit edilebilmiştir. Eşiğin yarısı ve çeyreği kullanıldığında sırası ile pencereler ve bina kenarı tespit edilebilmiştir (Şekil 9.b ve c). Kenar görüntüsüne uygulanan Otsu algoritması eşik olarak 42 değerini vermiştir. Belirtilen değerle yapılan benirizasyonda başarılı biçimde pencerelerdeki ısı kayıpları tespit edilebilmiştir (Şekil 9.d). Eşik değerin yarısı kullanıldığında pencereler güçlü biçimde belirlenmiştir (Şekil 9.e). Ayrıca bina kenarları ve duvar dışinden kaynaklanan ısı kaybı tespit edilmiştir. Eşik değerin çeyreği kullanıldığında ise bina dış cephesi üzerindeki çok sayıdaki nokta ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 9.f).

4.5 Kirsch Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Kirsch Edge Detection Operator)

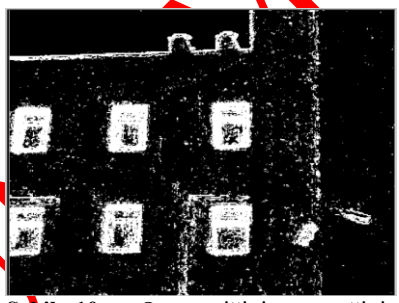
Kirsch kenar belirleme operatörü ile elde edilen sonuçlar Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10.a. Kirsch operatörünün sonucu. (Result of Kirsch operator)



Şekil 10.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



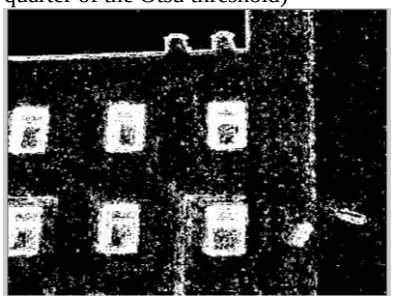
Şekil 10.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 10.d. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image)



Şekil 10.e. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image)



Şekil 10.f. Kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image)

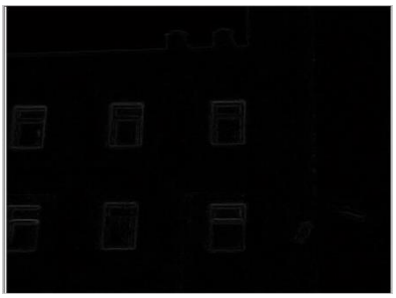
Kirsch kenar belirleme operatörü ile elde edilen Şekil 10.a'daki görüntü diğer yöntemlere kıyasla daha fazla kenar içermektedir. Pencere ve bina sınırları çok daha güçlü bir şekilde belirlenmiş ve bina cephesi üzerinde çok sayıda nokta kenar olarak tanımlanmıştır. Kirsch pusula maskeleri kenarın şiddetini büyülttüğü için görüntü üzerindeki ufak parlaklık değişiklikleri kenar olarak tanımlanabilmektedir.

Otsu algoritması ile elde edilen eşik değeri kullanıldığında pencerelerdeki ısı kaybı ile bina cephesindeki ısı kaybı belirlenebilmiştir. Bu eşiğin yarısı kullanıldığında Şekil 10.b'de sunulduğu üzere bina kenarı güçlü biçimde belirlenmiştir. Eşik değerinin çeyreği uygulandığında ise duvar dişindeki ısı kaybı da belirlenmiştir (Şekil 10.c). Otsu algoritması ile kenar görüntü için 100 eşik değerini vermiştir. Bu eşik değerle pencerelerdeki ısı kaybı çok güçlü biçimde tespit edilmiş, bina kenarı ise zayıf biçimde belirlenebilmiştir (Şekil 10.d). Eşik değerin yarısı uygulandığında Şekil 10.e'de sunulduğu üzere bina kenarı kuvvetli biçimde tespit edilmiştir. Ayrıca duvar dişinden kaynaklanan ısı kaybı da tespit edilmiştir. Eşik değerin çeyreği uygulandığında duvar dişindeki ısı kaybı belirlenmiş ve bina dış yüzeyinde bulunan çok sayıda nokta ısı kaybı noktası olarak tespit edilmiştir (Şekil 10.f).

4.6 Frei-Chen Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Frei-Chen Edge Detection Operator)

Frei-Chen kenar belirleme operatörü ile elde edilen sonuçlar Şekil 11'de sunulmuştur.

TEKNİK BASIM



Şekil 11.a. Frei-Chen kenar belirleme operatörünün sonucu. (Result of Frei-Chen edge-detection operator)



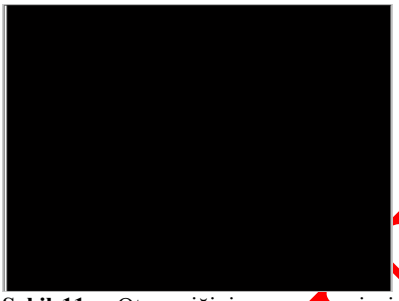
Şekil 11.b. Frei-Chen çizgi belirleme operatörünün sonucu. (Result of Frei-Chen line-detection operator)



Şekil 11.c. Otsu eşiğinin yarısının kenar belirlemeye uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold to edge-detection)



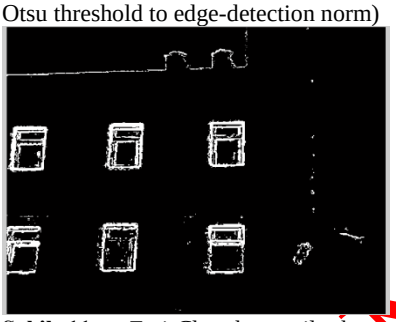
Şekil 11.d. Otsu eşiğinin çeyreğinin kenar belirlemeye uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold to edge-detection norm)



Şekil 11.e. Otsu eşiğinin yarısının çizgi belirlemeye uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold to line-detection norm)



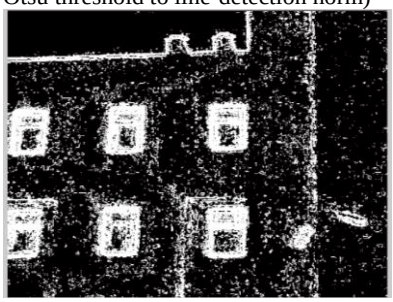
Şekil 11.f. Otsu eşiğinin çeyreğinin çizgi belirleme normuna uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold to line-detection norm)



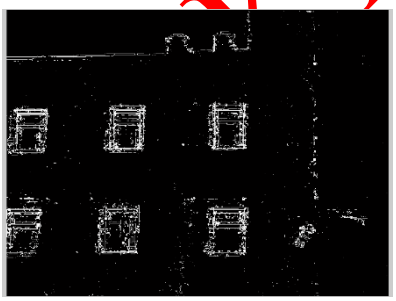
Şekil 11.g. Frei-Chen-kenar ile kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen-Edge)



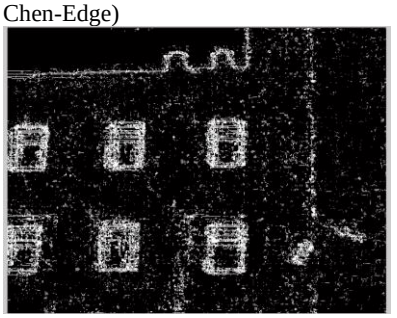
Şekil 11.h. Frei-Chen-kenar ile kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen-Edge)



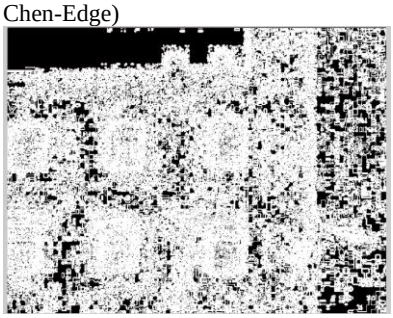
Şekil 11.ı. Frei-Chen-kenar ile kenar görüntüsünden belirlenen çeyrek Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen-Edge)



Şekil 11.j. Frei-Chen-çizgi ile kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen Line)



Şekil 11.k. Frei-Chen-çizgi ile kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen Line)



Şekil 11.l. Frei-Chen çizgi ile kenar görüntüsünden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Frei-Chen Line)

Frei-Chen operatörünün sunduğu kenar görüntüsü Şekil 11.a'da gösterilmiştir. Frei-Chen ile tespit edilen kenarların parlaklık değeri diğer operatörlerle kıyaslandığında daha düşüktür. Bu nedenle görüntüden Otsu algoritmasıyla elde edilen eşik değeri ile yapılan benirizasyonda ısı kaybı olan bölgeler

belirlenememiştir. Eşik değerinin yarısı ve çeyreği uygulandığında sırası ile Şekil 11.c ve Şekil 11.d'de sunulduğu üzere ısı kaybı bölgelerinin çok az bir kısmı tespit edilebilmiştir. Frei-Chen çizgi operatörünün sunduğu kenar görüntüsü Şekil 11.b'de gösterilmiştir. Elde edilen görüntü Frei-Chen kenar operatörü dâhil olmak üzere diğer operatörlerden daha düşük parlaklık değerine sahiptir. Bu görüntü üzerinde yapılan Otsu eşik değerinin yarısı ve çeyreği ile yapılan benirizasyon işlemleri sırası ile Şekil 11.e ve f'de sunulmuştur. Frei-Chen kenar operatörü üzerinde termal görüntüden elde edilen eşik değerle ısı kaybı noktası tespit edilememiştir.

Kenar görüntüsüne Otsu algoritması uygulandığında eşik değeri 10 hesaplanmıştır. Bu değerle yapılan benirizasyonda pencerelerdeki ısı kaybı Şekil 11.g'de gösterildiği üzere net, bina yüzeyinde oluşan ısı kaybı ise zayıf biçimde tespit edilmiştir. Eşik değerin yarısı uygulandığında pencerelerde tespit edilen ısı kaybı bölgeleri yoğunlaşmış, duvar dışindeki ısı kaybı tespit edilmiş ve bina kenarı daha kesin belirlenmiştir (Şekil 11.h). Eşik değerin çeyreği atandığında ısı kaybı noktaları yoğunlaşmış ve binanın ön cephesi ile yan cephesinin büyük kısmı ısı kaybı noktası olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 11.ı). Eşik değerin çok düşürülmesi benirizasyonu gürültüye duyarlı hale getirmiştir. Şekil 11.ı'nın üst kısımlarında bina yüzeyine ait olmayan bazı kesimler ısı kaybı noktası olarak sınıflandırılmıştır.

Çizgi belirleme operatörü üzerinde Otsu algoritması uygulanmış ve eşik değeri 3 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen eşik değeriyle ısı kaybına neden olan bölgeler kenar operatörüne göre daha ince ve daha zayıf biçimde tespit edilmiştir (Şekil 11.j). Bununla birlikte binanın çevresi ve duvar dişinden kaynaklanan ısı kaybı daha nettir. Eşik değerinin yarısı uygulandığında binanın ön cephesi ve yan cephesi de ısı kaybı görülen kısımlar olarak sınıflandırılmıştır. Eşik değerinin küçültülmesi benirizasyon işlemini gürültüye çok duyarlı hale getirmiş ve Şekil 11.k'de sunulduğu üzere görüntünün üst kısmında kalan birçok nokta ısı kaybına yol açan kesim olarak sınıflandırılmıştır. Eşik değerinin çeyreği 1 değerine eşittir ve elde edilen sonuç Şekil 11.l'de sunulmuştur. Sınıflandırma gürültüden çok etkilenmiş ve binaya ait olmayan havayı temsil eden bölgeler ısı kaybı noktası olarak sınıflandırılmıştır.

4.7 Modifiye Frei-Chen Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Modified Frei-Chen Edge Detection Operator)

Modifiye Frei-Chen algoritmasının sonuçları Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12.a. Modifiye Frei-Chen operatörünün sonucu. (Result of Modified Frei-Chen operator)



Şekil 12.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



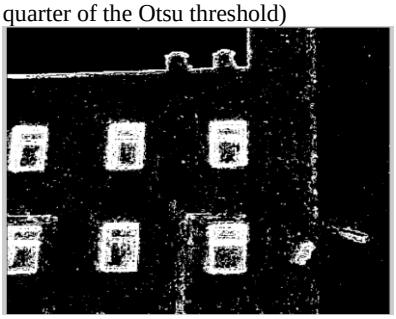
Şekil 12.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 12.d. Modifiye Frei-Chen ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen)



Şekil 12.e. Modifiye Frei-Chen ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen)



Şekil 12.f. Modifiye Frei-Chen ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen)

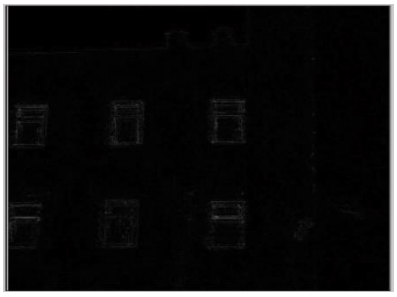
Modifiye Frei-Chen kenar belirleme yöntemi orijinal haline göre kenarları daha güçlü belirlemektedir (Şekil 12.a). Kenar görüntüsü üzerinde termal görüntüden elde edilen Otsu eşik değerinin uygulanması sonucunda çok az bir kısımdaki ısı kaybı tespit edilebilmiştir. Eşik değerin yarısının ve eşik değerin çeyreğinin uygulanması durumunda sırası ile Şekil 12.b ve 12.c'de sunulan görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerde tespit edilen ısı kaybı noktaları artmış olmasına rağmen tespit edilen noktalar yetersizdir.

YAYINLANMIŞTIR

Kenar görüntüsüne uygulanan Otsu algoritması 13 eşik değerini sunmaktadır. Elde edilen eşik değerinin uygulanması sonucu Şekil 12.d'de gösterildiği üzere pencerelerde oluşan ısı kaybı tespit edilebilmiştir. Fakat orijinal Frei-Chen operatörüne göre modifiye yöntemde bina kenarı daha zayıf biçimde tespit edilebilmiştir. Eşik değerin yarısı uygulandığında pencereler daha net biçimde tespit edilmiş, bina kenarı daha güçlü biçimde oluşturulmuş ve duvar dişinden kaynaklanan ısı kaybı zayıf da olsa belirlenmiştir (Şekil 12.e). Eşik değerin çeyreği uygulandığında binanın ön cephesi ve yan cephesi üzerindeki birçok nokta ısı kaybı noktası olarak belirlenmiştir. Modifiye Frei-Chen operatöründe havanın ısı kaybı noktası olarak belirlenme oranı oldukça azalmıştır. Bu durum modifikasyonun yöntemin gürültüye duyarlılığını azalttığını göstermektedir.

4.8 Modifiye Frei-Chen II Kenar Belirleme Operatörünün Uygulanması (Implementation of Modified Frei-Chen II Edge Detection Operator)

Modifiye Frei-Chen II algoritmasının sonuçları Şekil 13'te sunulmuştur.



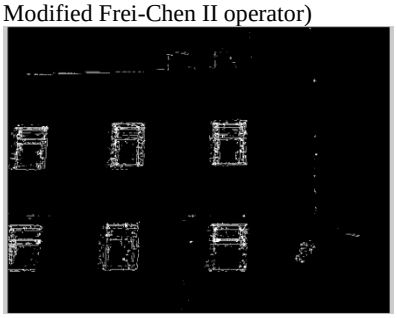
Şekil 13.a. Modifiye Frei-Chen II operatörünün sonucu. (Result of Modified Frei-Chen II operator)



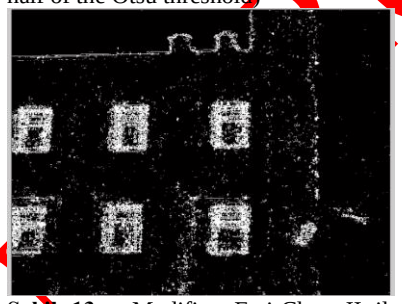
Şekil 13.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



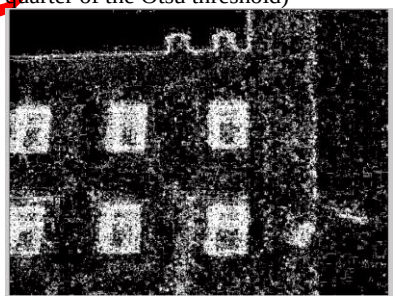
Şekil 13.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 13.d. Modifiye Frei-Chen II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen II)



Şekil 13.e. Modifiye Frei-Chen II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen II)



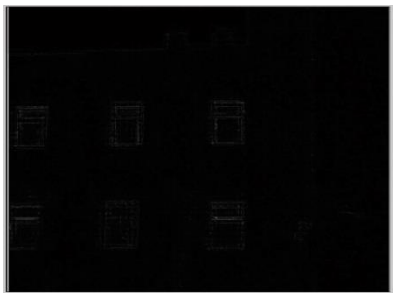
Şekil 13.f. Modifiye Frei-Chen II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Modified Frei-Chen II)

Modifiye Frei-Chen II eğri kenarları belirlemeye yöneliktir. Bu nedenle Şekil 13.a'da sunulan kenar belirleme işlemi sonucunda yatay ve düşey kenarlar bulanıklaşmış, bina kenarı tespiti zayıflamıştır. Otsu algoritması ile termal görüntü üzerinde elde edilen eşik değerin yarısı ve çeyreğinin uygulanması ile ısı kaybı olan bölgelerin çok az bir kısmı belirlenmiştir (Şekil 13.b ve c). Kenar görüntüsü üzerinde Otsu algoritmasının uygulanması sonucunda 18 eşik değeri elde edilmiş ve yapılan benirizasyon işleminin sonucu Şekil 13.d'de sunulmuştur. Elde edilen görüntü çizgi belirleyen Frei-Chen operatörüne benzemektedir fakat ısı kaybı noktaları daha azdır. Eşik değerinin yarısı uygulandığında pencerelerde oluşan ısı kaybı, duvar dişinden kaynaklanan ısı kaybı ve bina kenarı net biçimde tespit edilmiştir (Şekil 13.e). Eşik değerinin çeyreği uygulandığında binanın ön cephesi ve yan cephesinde oluşan ısı kaybı tespit edilmiştir (Şekil 13.f). Eşik değerinin çok düşürülmesi, sonucu gürültüye çok bağlı hale getirmiş ve havayı temsil eden görüntü elemanları ısı kaybı noktası olarak tanımlanmıştır.

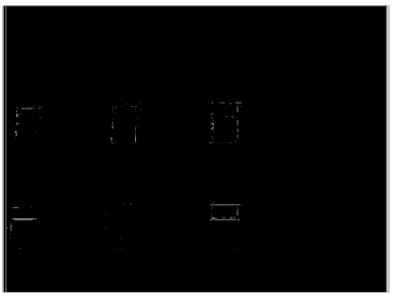
4.9 Laplace Kenar Belirleme Algoritmasının Uygulanması (Implementation of Laplace Edge Detection Algorithm)

Laplace kenar belirleme algoritmasının sonuçları Şekil 14'te sunulmuştur.

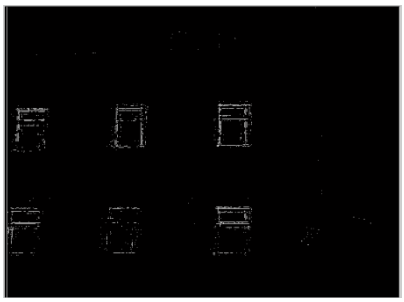
ERKEN BASIM



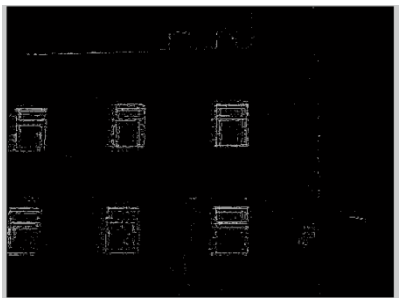
Şekil 14.a. Laplace operatörünün sonucu. (Result of Laplace operator)



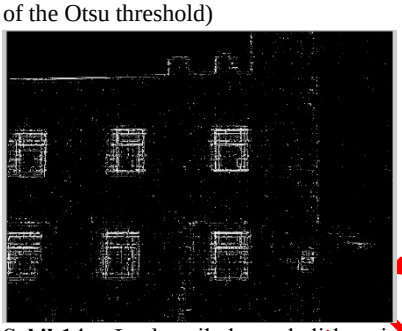
Şekil 14.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



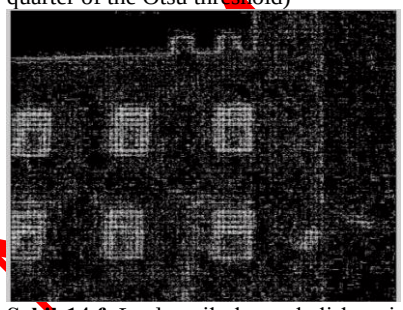
Şekil 14.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 14.d. Laplace ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace)



Şekil 14.e. Laplace ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace)



Şekil 14.f. Laplace ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace)

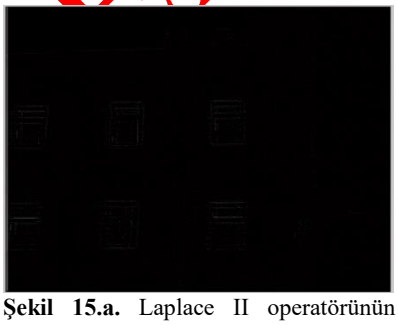
Laplace operatörü Şekil 14.a'da sunulduğu üzere binadaki ısı kayıplarını zayıf biçimde belirlemiştir. Kenar görüntüsünde pencerelerdeki ısı kaybı bölgeleri oldukça zayıftır. Bunun sonucunda termal görüntü üzerinden Otsu algoritmasıyla belirlenen eşik değerin yarısı uygulanarak yapılan benirizasyon sonucunda ısı kaybına neden olan bölgelerin önemli bir kısmı tespit edilememiştir (Şekil 14.b). Eşiğin çeyreği uygulandığında pencerelerdeki ısı kaybı belirlenmiş, bina kenarı tanımlanamamıştır (Şekil 14.c).

Kenar görüntüsüne Otsu algoritması uygulanmış ve eşik değeri 19 olarak belirlenmiştir. Kenar görüntüsü üzerinde eşik değer kullanılarak yapılan benirizasyon işleminde Şekil 14.d'de sunulduğu üzere pencerelerdeki ısı kaybı güçlü biçimde, duvar dişi nedeniyle oluşan ısı kaybı ve bina kenarı zayıf biçimde belirlenmiştir. Eşik değerinin yarısı uygulandığında ısı kaybına neden olan noktalar daha güçlü biçimde tespit edilmiştir (Şekil 14.e). Eşik değerin çeyreği uygulandığında gürültü duyarlılığı çok artmış ve binaya ait olmayan noktaların ısı kaybı noktası olarak sınıflandırılmasına neden olmuştur (Şekil 14.f). Laplace operatörünün gerçekleştirdiği sınıflandırma x ve y yönlerinde ortogonal ızgara biçimindedir.

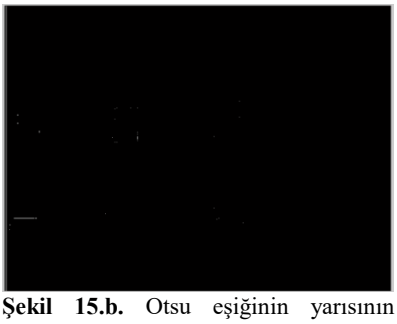
4.10 İkinci Derece Laplace Kenar Belirleme Algoritmasının Uygulanması (Implementation of Second Order Laplace Edge Detection Algorithm)

İkinci derece Laplace operatörü uygulanmış ve Şekil 15'te gösterilen sonuç elde edilmiştir.

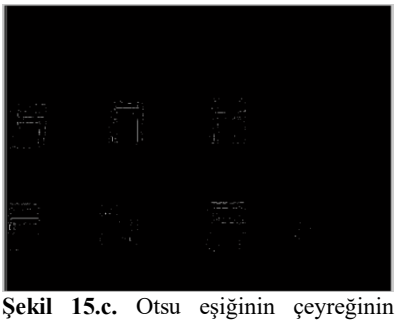
ERKEN GÖRÜNÜM



Şekil 15.a. Laplace II operatörünün sonucu. (Result of the second order Laplace operator)

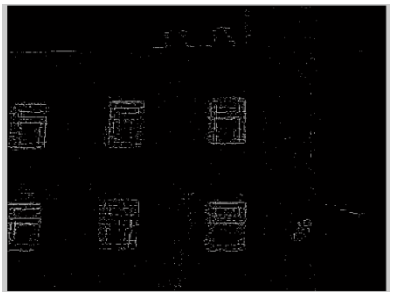


Şekil 15.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)

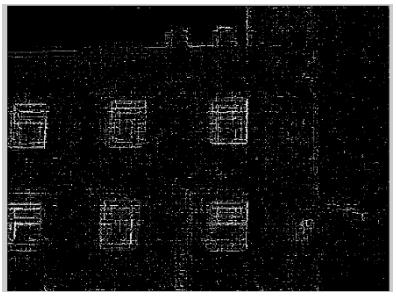


Şekil 15.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)

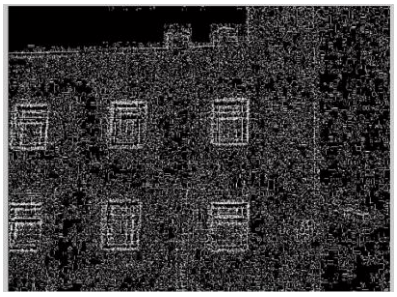
Şekil 15. (Devam (continued))



Şekil 15.d. Laplace II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace II)



Şekil 15.e. Laplace II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace II)

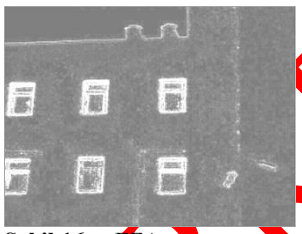


Şekil 15.f. Laplace II ile kenar belirlenmiş görüntüden belirlenen Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image of Laplace II)

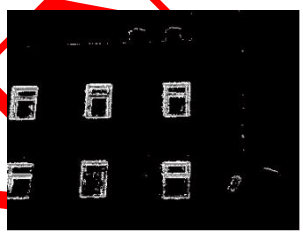
İkinci derece Laplace operatörü ile ısı kaybı bölgeleri Şekil 15.a'da gösterildiği üzere göreceli olarak zayıf biçimde belirlenmiştir. Bu nedenle termal görüntü üzerinde Otsu Algoritması ile elde edilen eşik değerinin yarısı uygulanarak yapılan benirizasyon işlemi sonucunda ısı kaybı oluşan bölgelerin çok azı tespit edilmiştir (Şekil 15.b). Eşiğin çeyreği ile Şekil 15.c'de gösterildiği üzere pencerelerle sınırlı olacak şekilde ısı kaybı bölgeleri daha belirgin tespit edilmiştir. Kenar görüntüsüne Otsu Algoritmasının uygulanması sonucu eşik değeri 12 olarak hesaplanmış ve ısı kaybı olan bölgeler ile bina kenarı birinci dereceden Laplace operatörüne göre daha zayıf biçimde belirlenmiştir (Şekil 15.d). Eşik değerin yarısı uygulandığında ısı kaybına neden olan noktalar daha güçlü belirlenmiştir (Şekil 15.e). Duvar dışından kaynaklanan ısı kayıpları ile bina kenarı önemli ölçüde tespit edilmiştir. Eşik değerin çeyreği uygulandığında binanın neredeyse tamamı ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bina dışında olduğu halde görüntünün üst kısmında birkaç bölge hatalı biçimde ısı kaybı noktası olarak belirlenmiştir (Şekil 15.f).

4.11 Entegre Fonksiyon Algoritmasının Uygulanması (Implementation of Integrated Function Algorithm)

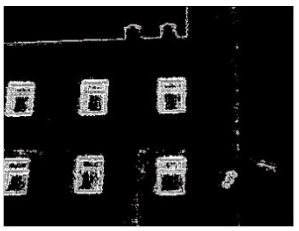
Entegre Fonksiyon Algoritması uygulanmış ve Şekil 16'da sunulan görüntüler elde edilmiştir.



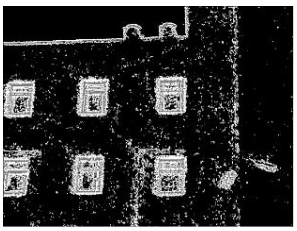
Şekil 16.a. EFA operatörünün sonucu. (Result of the IFA)



Şekil 16.b. Otsu eşiğinin uygulanması (Implementation of the Otsu threshold)



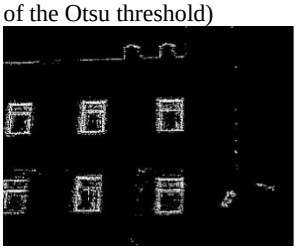
Şekil 16.c. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



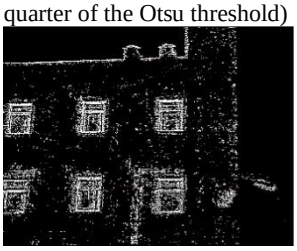
Şekil 16.d. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 16.e. Otsu eşiği uygulanarak sınıflandırma (classification by implementing the Otsu threshold)



Şekil 16.f. Otsu eşiğinin yarısı uygulanarak sınıflandırma (Classification by implementing the half of the Otsu threshold)



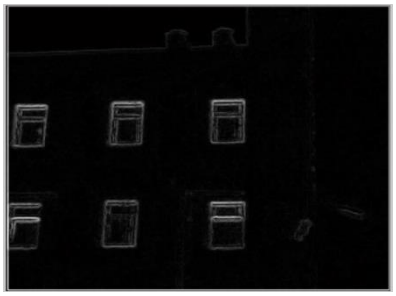
Şekil 16.g. Otsu eşiğinin çeyreği uygulanarak sınıflandırma (Classification by implementing the quarter of the Otsu threshold)

ERKEN GÖRÜNÜM

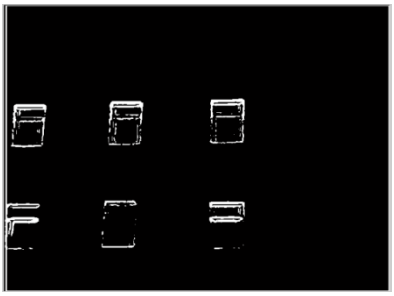
Şekil 16 b, c, d'de sırası ile Otsu eşiği, yarısı ve çeyreği ile yapılan sınıflandırma sonucu elde edilen S görüntüleri sunulmuştur (Çizelge 1). Şekil 16.b., c ve d'de gri bölgeler "-", beyaz bölgeler ise "+" sınıflandırmayı ifade etmektedir. Sınıflandırma görüntüleri üzerinden yapılan nesne belirleme sonuçları ise sırası ile e, f ve g'de gösterilmektedir. Sınıflandırma işlemi sürekli nokta kümesi aradığı için ısı kaybı olarak tanımlanan bazı bölgeler kaybolmuştur. Otsu eşiğinin çeyreği uygulandığında camlar ve duvar dişi ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanmıştır.

4.12 Canny Kenar Belirleme Algoritmasının Uygulanması (Implementation of Canny Edge Detection Algorithm)

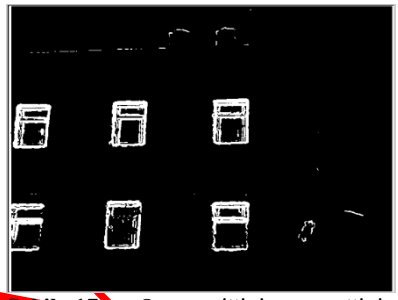
Canny kenar belirleme algoritması uygulanmış ve sonuçları Şekil 17'de sunulmuştur.



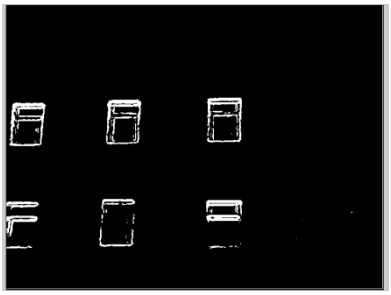
Şekil 17.a. Canny operatörünün sonucu. (Result of the Canny operator)



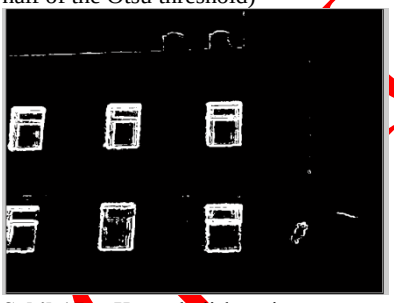
Şekil 17.b. Otsu eşiğinin yarısının uygulanması (Implementation of the half of the Otsu threshold)



Şekil 17.c. Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması (Implementation of the quarter of the Otsu threshold)



Şekil 17.d. Kenar belirlenmiş görüntüye Otsu eşiğinin uygulanması. (Implementation of the Otsu threshold obtained by the edge image)



Şekil 17.e. Kenar belirlenmiş görüntüye Otsu eşiğinin yarısının uygulanması. (Implementation of the half of the Otsu threshold obtained by the edge image)



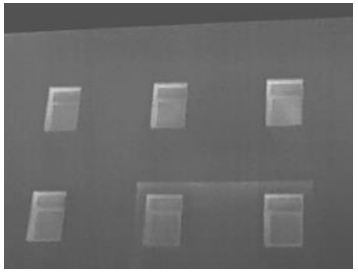
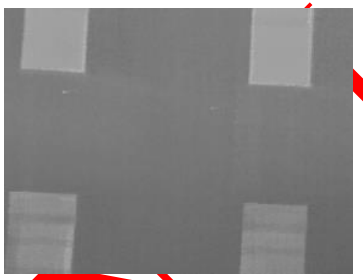
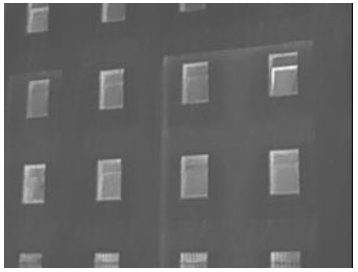
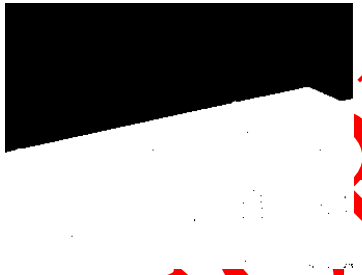
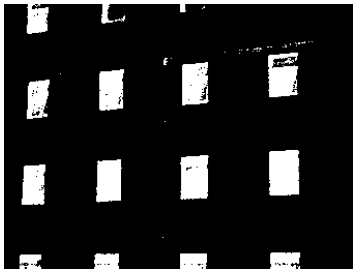
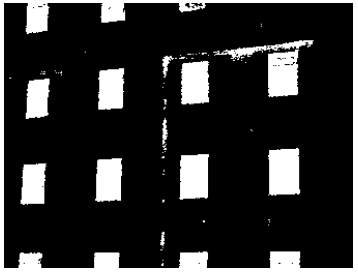
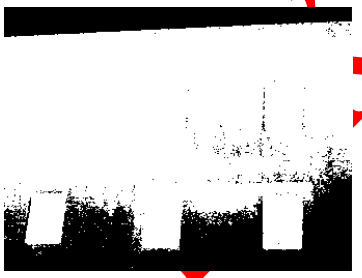
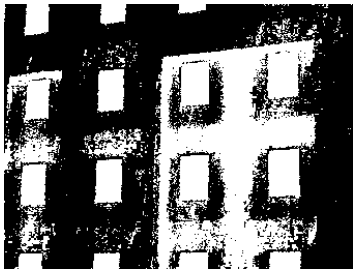
Şekil 17.f. Kenar belirlenmiş görüntüye Otsu eşiğinin çeyreğinin uygulanması. (Implementation of the quarter of the Otsu threshold obtained by the edge image)

Canny Kenar belirleme operatörünün uygulanması sonucu elde edilen görüntü Şekil 17.a'da gösterilmiştir. Uygulanan Gauss filtresi pencere kenarlarını korumuş, fakat bina kenarlarını zayıflatmıştır. Termal görüntü üzerinden belirlenen eşik değerinin uygulanması sonucunda pencerelerde oluşan ısı kaybının çok az bir kısmı belirlenmiştir. Eşik değerinin yarısının uygulanması sonucunda pencerelerdeki ısı kaybı daha belirgin tespit edilmiş, fakat bina kenarı belirlenememiştir (Şekil 17.b). Eşik değerinin çeyreği uygulandığında Şekil 17.c'de sunulduğu üzere bina kenarı zayıf biçimde tespit edilebilmiştir.

Otsu algoritması kenar görüntüsü üzerinde uygulanmış ve eşik değeri 51 olarak belirlenmiştir. Eşik değerinin uygulanması ile pencerelerdeki ısı kaybı tespit edilmiştir (Şekil 17.d). Eşik değerinin yarısı uygulandığında pencereler daha güçlü, bina kenarı ise zayıf biçimde belirlenmiştir (Şekil 17.e). Eşik değerin çeyreği uygulandığında bina kenarı güçlü biçimde belirlenmiştir (Şekil 17.f). Eşik değerin düşürülmesiyle bina kenarları daha net belirlenmiş, duvar dışındeki ısı kaybı da tespit edilebilmiştir. Gauss filtresinin uygulanması benirizasyonun gürültüye duyarlılığını önemli ölçüde düşürmüş ve bina yüzeyinin ısı kaybı noktası olarak sınıflandırılması oldukça azalmıştır. Bina kenarı, pencere ve duvar dışından kaynaklanan ısı kaybı belirlenirken gürültüden kaynaklı hatalı ısı kaybı tespitleri giderilmiştir.

İlk analizde termal görüntüsü üzerinden elde edilen Otsu eşiği ile kenar görüntüsü üzerinde ısı kayıp bölgelerinin uygun biçimde tespit edilemediği ve Otsu eşiğinin kenar görüntüsü üzerinden belirlenmesi halinde daha yüksek doğrulukta ısı kayıp bölgelerinin tespit edildiği görülmüştür. Şekil 1'de sunulan termal görüntü ile aynı zaman ve koşulda alınan 4 termal görüntünün incelenmesi fazla yer işgal etmemesi için sadece kenar görüntüsü üzerinden elde edilen Otsu eşiği ile kenar görüntüleri üzerinde yapılan benirizasyon sonuçlarına yer vererek Şekil 18'de sunulmuştur.

ERKEN

Açıklama	A1	A2	A3	A4
Orijinal termal görüntüler				
Otsu 1				
Otsu 0,9				
Otsu 0,8				

Şekil 18. (Devam (continued))

Roberts (mutlak) 1



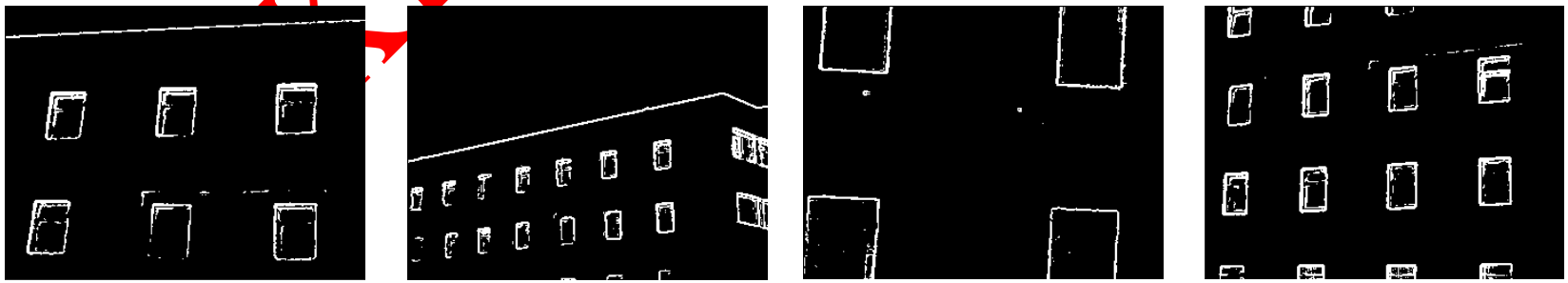
Roberts (mutlak) 0.5



Roberts (mutlak) 0.25



Sobel 1



Şekil 18. (Devam (continued))

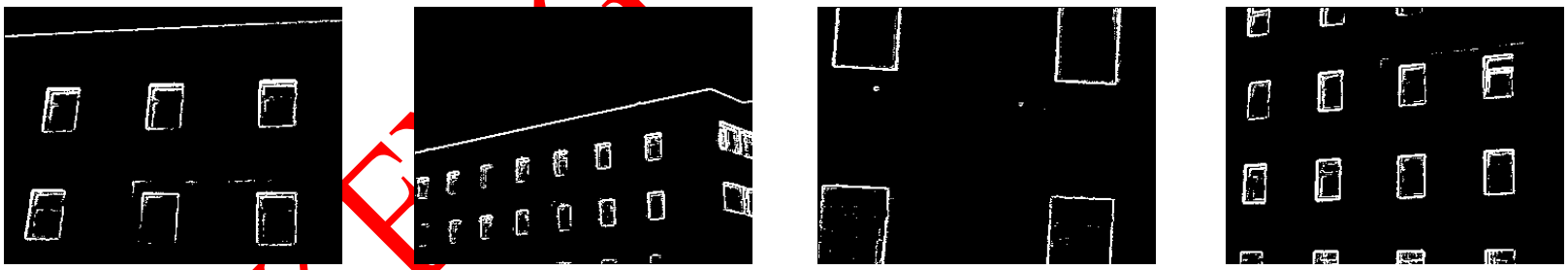
Sobel 0.5



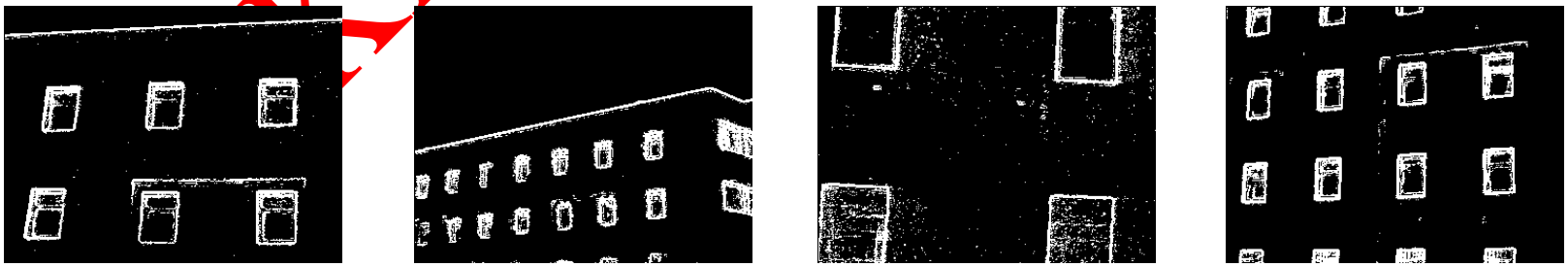
Sobel 0.25



Prewitt 1

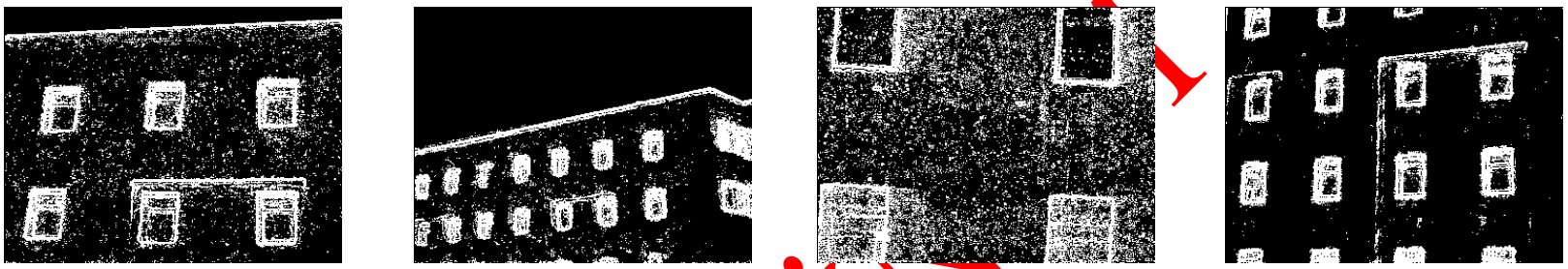


Prewitt 0.5



Şekil 18. (Devam (continued))

Prewitt 0.25



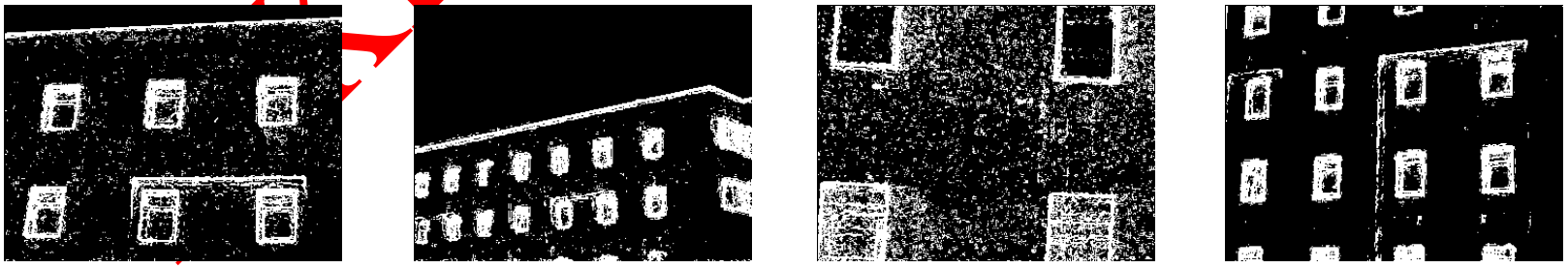
Robinson 1



Robinson 0.5



Robinson 0.25



Şekil 18. (Devam (continued))

Kirsch 1



Kirsch 0.5



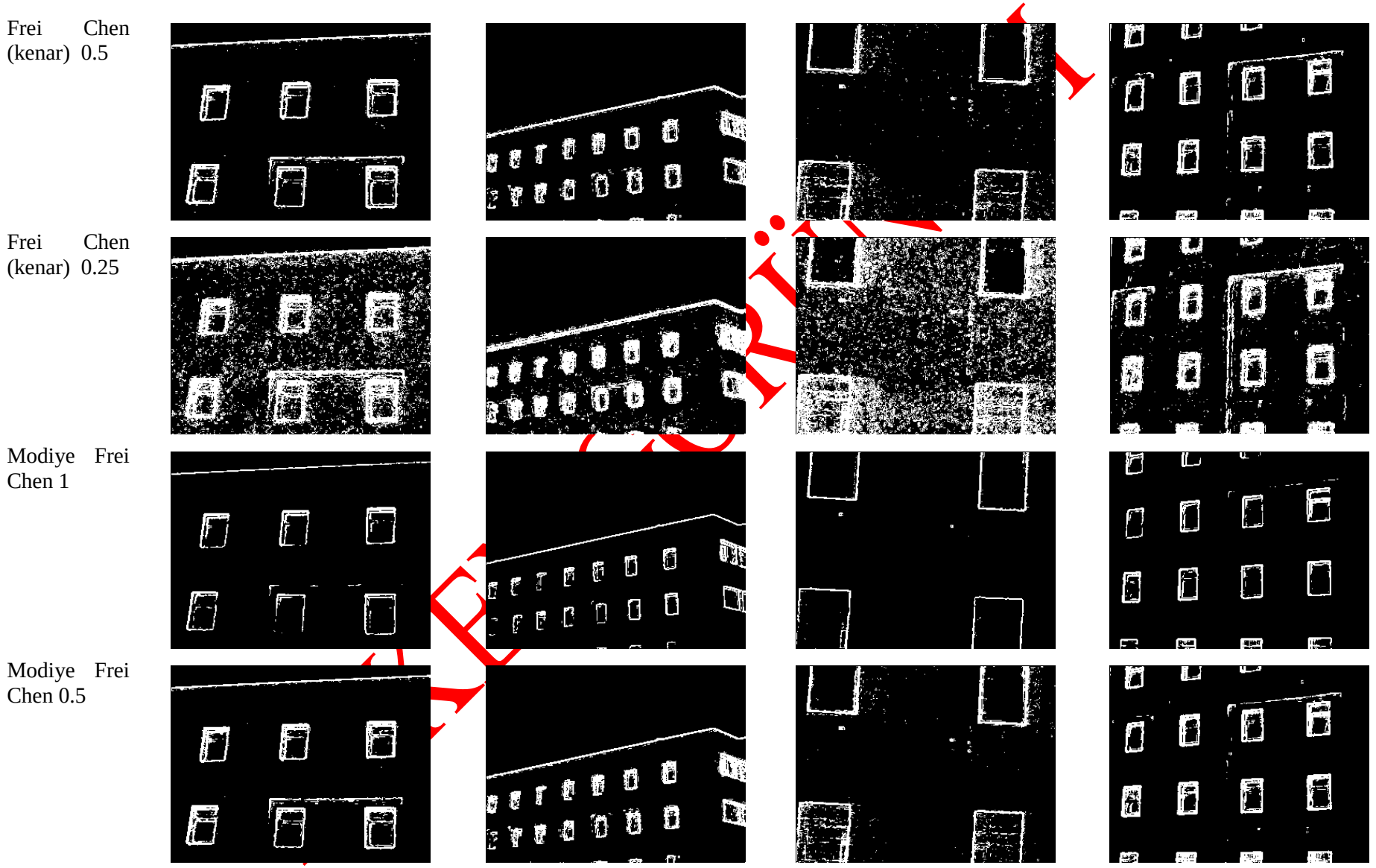
Kirsch 0.25



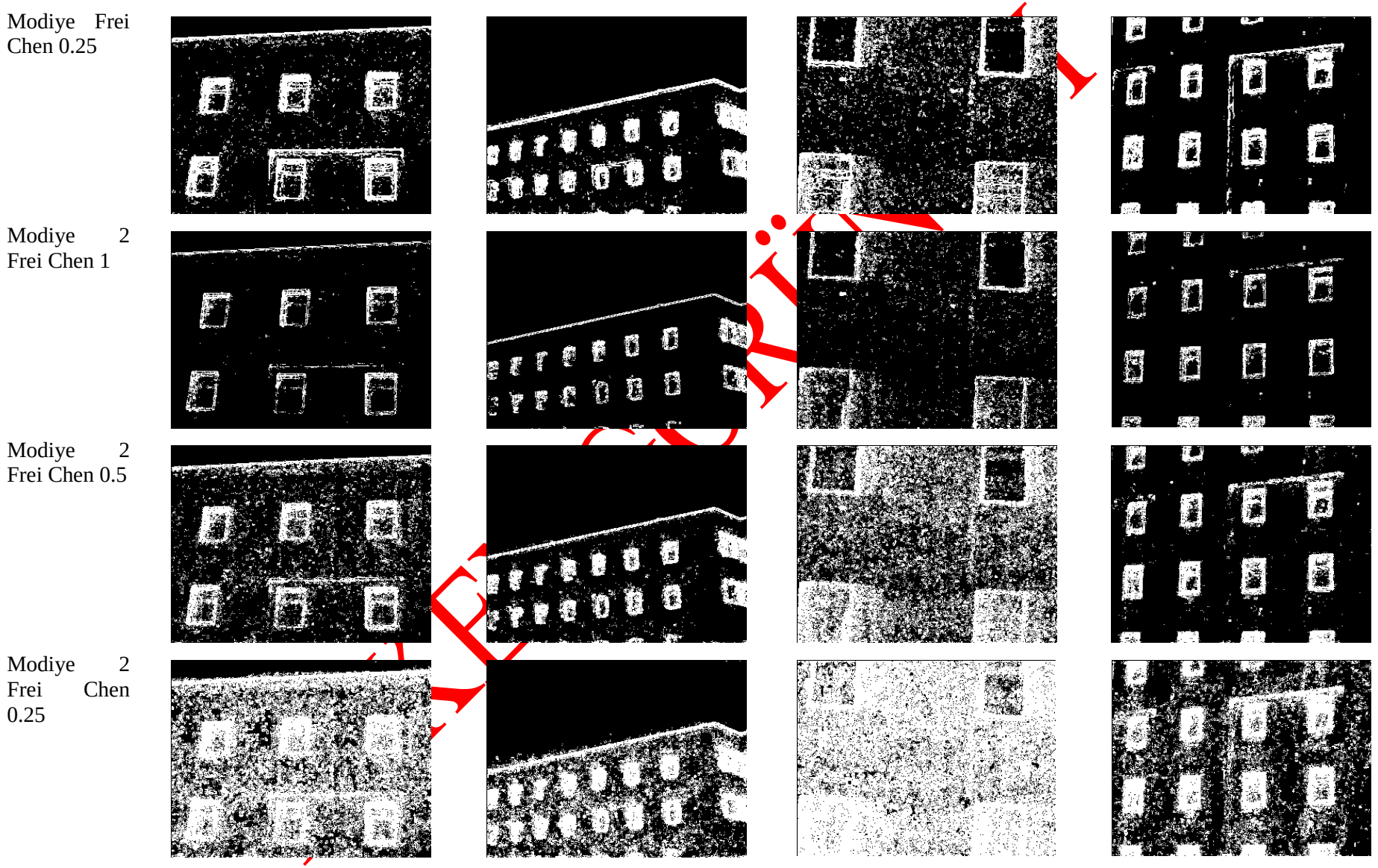
Frei Chen (kenar) 1



Şekil 18. (Devam (continued))

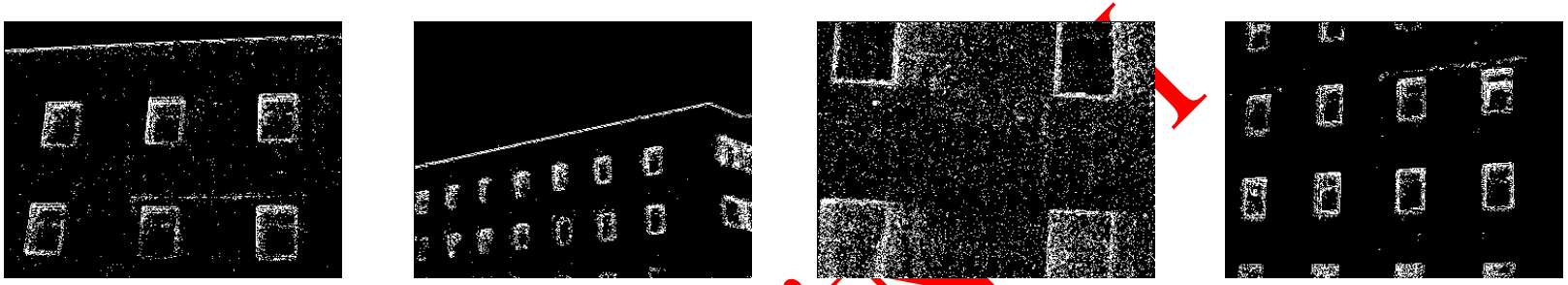


Şekil 18. (Devam (continued))

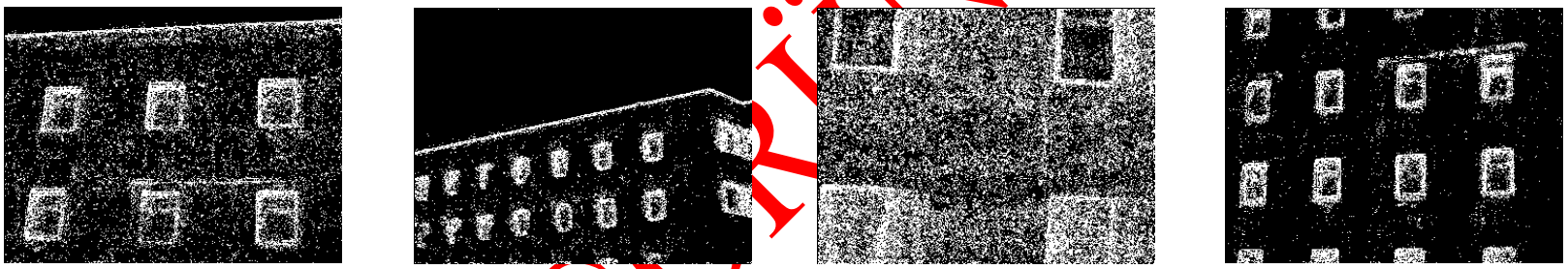


Şekil 18. (Devam (continued))

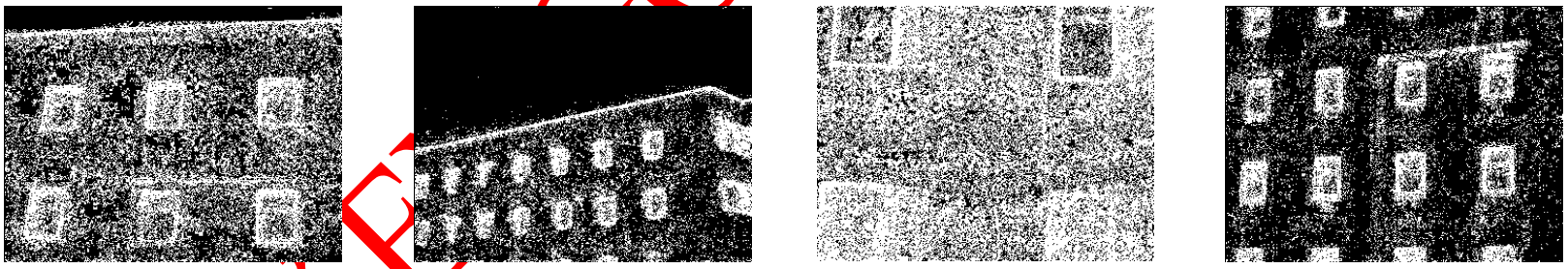
Laplace 1



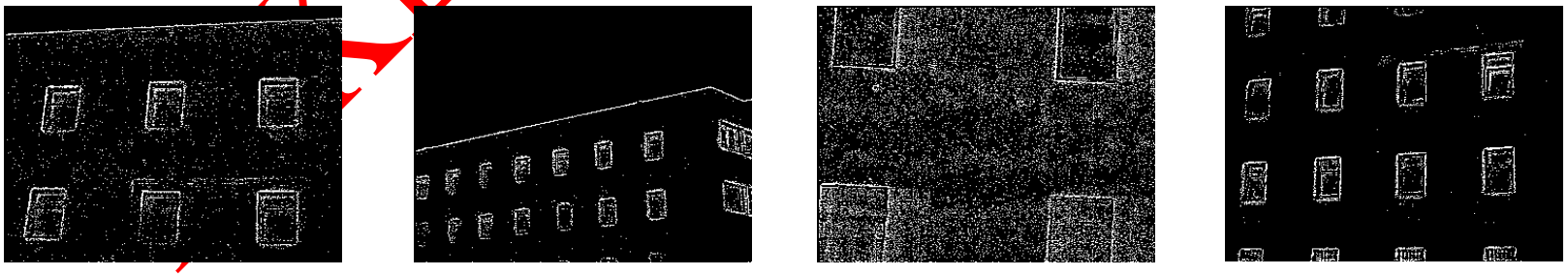
Laplace 0.5



Laplace 0.25



İkinci Dereceden Laplace 1



Şekil 18. (Devam (continued))

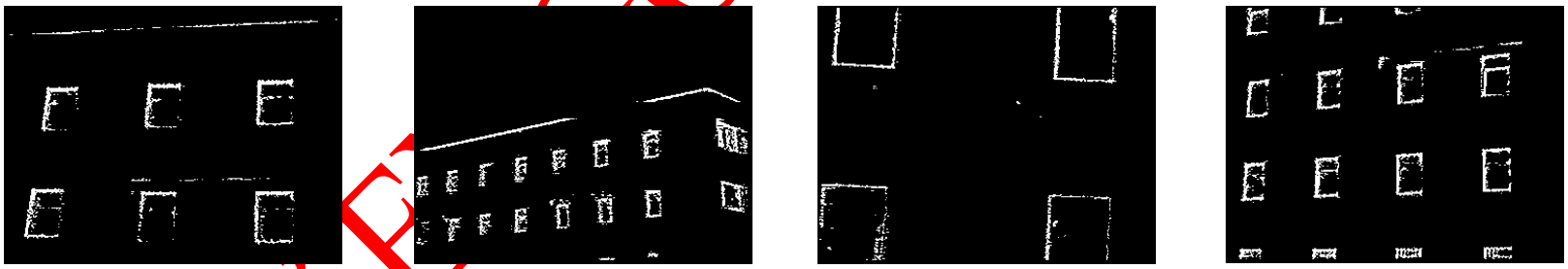
İkinci Dereceden Laplace 0.5



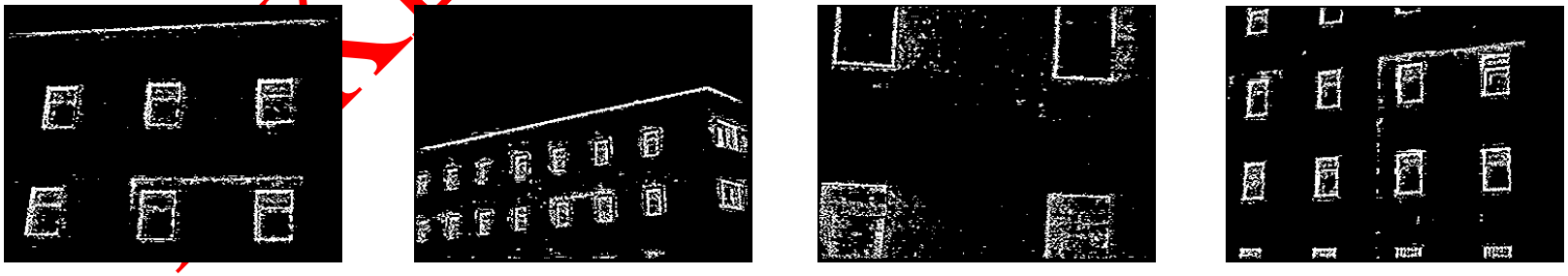
İkinci Dereceden Laplace 0.25



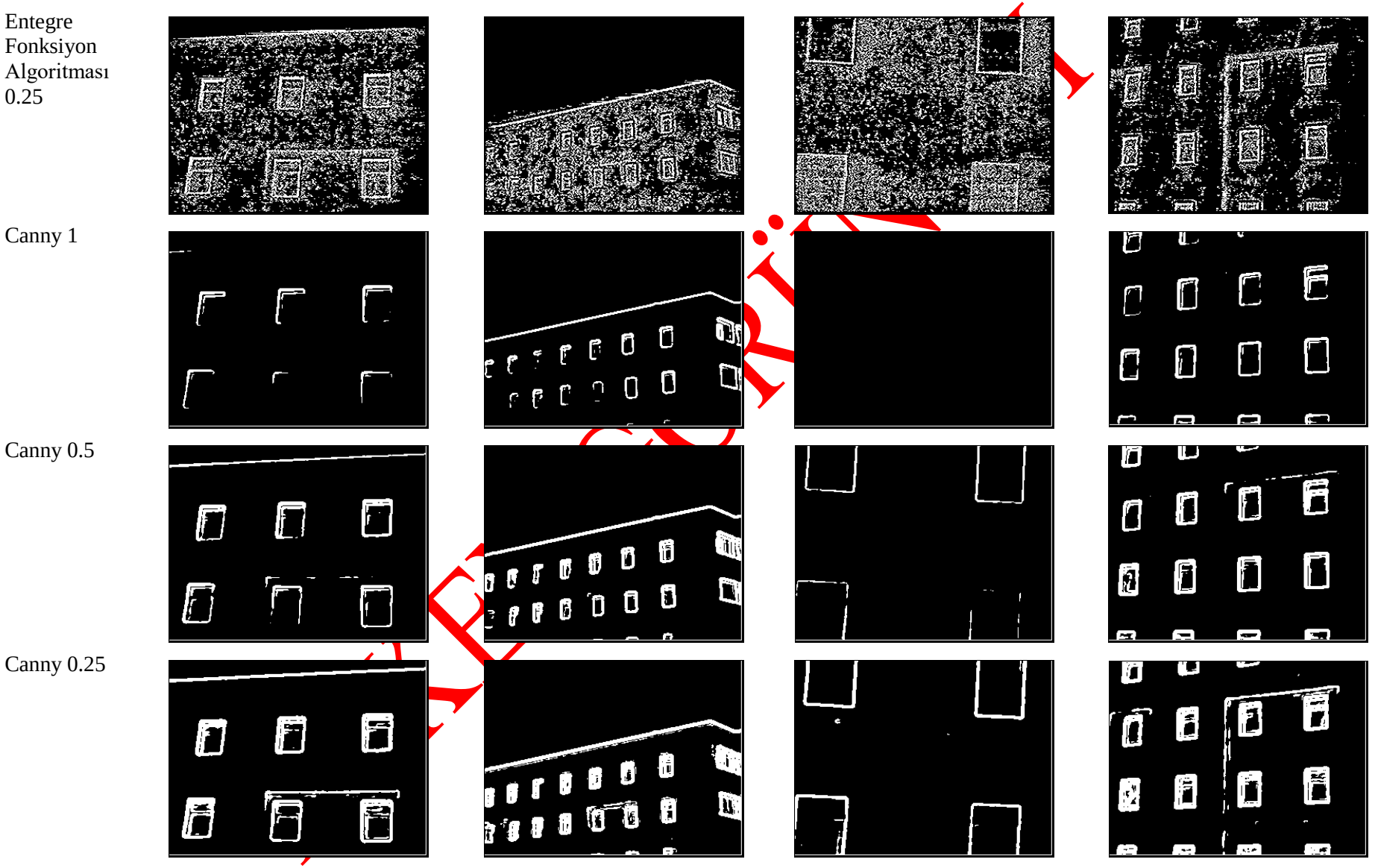
Entegre Fonksiyon Algoritması 1



Entegre Fonksiyon Algoritması 0.50



Şekil 18. (Devam (continued))



Şekil 18. 4 termal görüntünün analiz sonuçları. (Analysis results of 4 thermal images)

Şekil 18'de sunulan analiz sonuçları incelendiğinde yöntemlerin Şekil 6-17'de sunulan sonuçlara benzer olduğu görülmektedir. Şekil 18'deki görüntülere Otsu algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen eşik değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Termal görüntülerin eşik değerleri. (Threshold values of the thermal images)

Yöntem\Eşik	A1	A2	A3	A4
Otsu	123	96	137	117
Roberts	16	23	11	21
Sobel	68	92	53	90
Prewitt	52	71	39	70
Robinson	68	90	52	89
Kirsch	125	121	120	128
Frei-Chen	19	26	14	25
Frei-Chen M. I	22	31	17	30
Frei-Chen M. II	39	63	25	52
Laplace	35	61	20	50
2. Der. Laplace	21	43	11	34
ETA	113	124	105	126
Canny	80	68	116	71

5. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND RESULTS)

Bu çalışmada hiçbir insan müdahalesi olmadan termal görüntüler üzerinden ısı kayıplarının gerçekleştiği bölgeleri belirleyen bir hesaplama sürecinin oluşturulması amaçlanmıştır. Görüntüden bağımsız biçimde Otsu algoritması ile eşik değer tespit edilerek literatürde bulunan 12 adet kenar belirleme operatörünün performansları karşılaştırılarak en uygun olanları belirlenmiştir. Bina yüzeyinin termal görüntülenmesinin ardından bir uzman görüşüne ihtiyaç duymadan ısı kaybına yol açan bölgeleri tespit eden kenar belirleme operatörlerinin belirlenmesi ve hesaplama sürecinin oluşturulması makalenin bilimsel katkısıdır. Makalenin orijinal yönü ise YSA veya herhangi bir eşik değere ihtiyaç duymadan ısı kaybına yol açan bina kısımlarını tespit eden yöntemin önerilmesidir.

Isı yalıtım düzeyi bilinmeyen bina sayısı dikkate alındığında ısı yalıtımı performansının insan emeğine dayalı biçimde tespit edilmesi oldukça güç bir uğraş olacaktır. Ayrıca yalıtım malzemelerinin etkinliği zamanla azaldığı için yapıların ısı yalıtım performanslarının düzenli aralıklarda ölçülmesi gereklidir. Ölçüm sürecini hızlandırmak için görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapıların dış cephelerinin termal görüntülerinden yararlanılarak ısı kaybına yol açan bölgeleri en iyi tespit eden eşik tabanlı yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Doğrudan termal görüntü üzerinde Otsu algoritmasının uygulanması ile eşik tayin edilmesi ve termal görüntüye kenar belirleme operatörlerinin uygulanması sonrasında elde edilen kenar görüntüsüne Otsu algoritmasının uygulanması ile elde edilen eşik değerinin kullanılması olmak üzere 2 farklı yaklaşım uygulanmıştır.

Literatürde termal görüntüler üzerinden ısı kaybının belirlenmesinde uygulanan yöntemler; çok sayıda termal görüntü ile eğitilmiş YSA'nın kullanılması, bina yüzeyine ısı akışı ölçüm cihazlarını yerleştirip fotogrametrik kontrol noktaları ile görüntülerin orthorektifikasyonunu gerçekleştirip sonlu elemanlar yöntemi ile yüzeydeki ısı kayıplarının modellenip hesaplanması ve histogram analizidir. Uygulanan yöntemler ticari yazılımlarla gerçekleştirildiği için veri toplama ve değerlendirme süreci hem uzun sürmekte hem de pahalı yazılımların satın alınmasını gerektirmektedir. Histogram analizinde ise eşik değerlerin tespit edilmesi görüntüye bağlı biçimde değiştiği için sektör tarafından uygulanabilirliği düşüktür.

Önerilen yöntemin mevcut yöntemlere göre en önemli avantajı YSA veya derin öğrenme yöntemleri gibi binlerce görüntü kullanılarak eğitilmesine gerek kalmamasıdır. Ayrıca histogram analizi yöntemlerindeki gibi insan tarafından parametre veya eşik değer tayinine ihtiyaç duymamaktadır. Eşik değerin Otsu algoritması ile belirlenmesi sayesinde görüntünün parlaklık değerinden bağımsız biçimde eşik değeri tayin edilebilmekte ve ısı kayıbına yol açan bölgeler belirlenebilmektedir. Bu sayede önerilen yöntem insan müdahalesi olmadan nesnel biçimde ısı kaybı bölgelerini tespit edebilmektedir. Ayrıca denetim firmaları tarafından uygulanabilecek düzeyde maliyete ve düşük uygulama karmaşıklığına sahiptir. Fakat güncel literatüre denk çalışmaların yapılabilmesi için ileri çalışma olarak çok sayıda görüntünün alınıp işlenmesi ve YSA'nın eğitilmesi gereklidir.

Birinci uygulamada termal görüntüsü üzerinde Otsu algoritması uygulanmış ve elde edilen eşik değeri (T_1) termal görüntünün sınıflandırılmasında kullanılmıştır [69]. İkinci uygulamada kenar belirleme operatörlerinin termal görüntü ile konvolüsyonu sonucu elde edilen kenar görüntüsü üzerine T_1 eşik değeri ile sınıflandırma yapılmıştır. Üçüncü uygulamada ise kenar görüntüsü üzerinde Otsu algoritması uygulanmış ve elde edilen eşik değeri (T_2) kenar görüntüsünün sınıflandırılmasında kullanılmıştır [69]. Termal görüntüye uygulanan Otsu algoritması ile elde edilen eşik değeri (T_1) ile yapılan benirizasyon görüntünün alındığı koşullardan çok etkilenmektedir. Şekil 3, 4 ve 5'te sunulduğu üzere eşik değerdeki ufak değişimler sonucu çok etkilenmektedir. Ayrıca Şekil 18'de sunulan A2 görüntüsü de doğrudan termal görüntü üzerinde Otsu algoritması ile eşik belirlemenin uygun olmadığını göstermektedir. Şekil 6-17. b ve c'de sunulan analiz sonuçları T_1 eşik değerinin kenar görüntüsünde uygulanması ile ısı kayıplarının çok düşük bir kısmının tespit edilebildiğini göstermektedir. Bu nedenle termal görüntüye önce kenar belirleme operatörleri uygulanmış ve elde edilen kenar görüntülerine Otsu eşiği uygulanarak ısı kayıpları belirlenmiştir. İkinci derece

ERKEN GÖRÜNÜM

Çizelge 3. Uygulanan yöntemlerin genel değerlendirmesi. (General evaluation of the applied methods)

Yöntem	Sonuçların Değerlendirilmesi
Otsu 1	Pencere dışındaki ısı kayıplarının belirlenmesinde zayıf
Otsu 0.9	Görüntü elemanlarının parlaklık değerlerinin doğrudan kullanılarak yapılan sınıflandırma için en uygun yöntem
Otsu 0.8	Gürültüye çok duyarlı ve ısı kaybı bölgesi olarak çok fazla kısım sınıflandırılıyor
Roberts 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Roberts 0.5	Roberts 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları tanımlanabiliyor.
Roberts 0.25	Duvardan kaynaklı ısı kayıpları belirlenmektedir. Hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor.
Sobel 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Sobel 0.5	Sobel 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları kısmen tanımlanabiliyor.
Sobel 0.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor.
Prewitt 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Prewitt 0.5	Prewitt 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları tanımlanabiliyor.
Prewitt 0.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Az miktardaki hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor.
Robinson 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Robinson 0.5	Robinson 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları tanımlanabiliyor.
Robinson 0.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Az miktardaki hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor.
Kirsch 1	Pencereler, bina kenarları, işçilik hataları ve duvar dişi kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Kirsch 0.5	Kirsch 1'e ek olarak duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Gürültüye duyarlı.
Kirsch 0.25	Gürültüye çok duyarlı.
Frei-Chen 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Frei-Chen 0.5	Frei-Chen 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları kısmen tanımlanabiliyor.
Frei-Chen 0.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor. Gürültüye duyarlı.
Frei-Chen M1 1	Pencereler, bina kenarları ve işçilik hataları başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Frei-Chen M1 0.5	Frei-Chen M1 1'e ek olarak duvar dişlerindeki ısı kayıpları kısmen tanımlanabiliyor.
Frei-Chen M10.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Az miktardaki hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor.
Frei-Chen M2 1	Pencereler, bina kenarları, işçilik hataları ve duvar dişi kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Frei-Chen M2 0.5	Frei-Chen M2 1'e ek olarak duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor.
Frei-Chen M2 0.25	Duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor. Az miktardaki hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor. Gürültüye duyarlı.
Laplace 1	Pencereler, bina kenarları, işçilik hataları ve kısmen duvar dişi kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
Laplace 0.5	Laplace 1'e ek olarak duvar yüzeyindeki ısı kayıpları tespit edilebiliyor.
Laplace 0.25	Hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor. Gürültüye duyarlı.
2. D Laplace 1	Pencereler, bina kenarları, işçilik hataları ve duvar yüzeyi kaynaklı ısı kaybı başarılı biçimde tespit edilebiliyor.
2. D Laplace 0.5	2.D. Laplace 1'e ek olarak duvar dişi kaynaklı ısı kayıpları tespit edilebiliyor.
2. D Laplace 0.25	Hava ısı kaybı bölgesi olarak tanımlanabiliyor. Gürültüye duyarlı.
EFA 1	Uygun tanımlama yapamıyor. Bina kenarları sürekli değil.
EFA 0.5	Bina sınırları, pencereler, duvar dişleri ve işçilik hatalarını tanımlayabiliyor.
EFA 0.25	Gürültüye çok duyarlı.
Canny 1	Bina kenarları ve kısmen pencereler tespit edilebiliyor.
Canny 0.5	Canny 1'e ek olarak pencerelerdeki ısı kayıpları daha keskin tanımlanabiliyor.
Canny 0.25	Canny 0.5'e ek olarak işçilik hataları ve duvar dişi kaynaklı ısı kayıpları tespit edilebiliyor.

EDİLEN GÖRÜNÜM

Laplace ve Modifiye II Frei-Chen ile elde edilen sonuçlar Bernsen algoritmasına göre ısı kaybı bölgelerini daha başarılı biçimde belirlemiştir [51].
Görüntülerin alındığı termal kameranın çözünürlüğünün optik kameralara göre düşük düzeyde olması nedeniyle metal dübel kullanımı gibi uygunsuz imalatların tespiti oldukça güçtür. Bununla birlikte Şekil 18'de üçüncü sütunda sunulan termal görüntüde pencerenin hemen altında ve çaprazında bulunan iki nokta iş iskelesinin duvara sabitlenmesi için tij demirlerinin duvara monte edildiği yerlerdir. Yakından alınan termal görüntülerde ısı yalıtımı imalatının uygun yapılamadığı noktalar görüntülenebilmiştir, fakat yakın mesafeden görüntüleme yapılması halinde bir binanın analizi için çok sayıda termal görüntünün alınması gerekecektir.
Termal kameraların ilk yatırım maliyeti optik kameralara göre daha yüksektir. Orta çözünürlüklü olarak tanımlanabilecek 256x336 boyutunda görüntü alabilen bir termal kamera yaklaşık 3000$ karşılığı temin edilebilmektedir. Satın alma maliyeti yüksek olmasına rağmen binalarda tahribatsız biçimde ısı yalıtım performansı ölçümünü sağlayacak olması nedeniyle önerilen yöntemin uygulanabilme potansiyeli yüksektir. Çizelge 3'te kenar görüntülerine Otsu algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen eşik değerleri sunulmuştur.
Isı yalıtımı çimento ve agrega katkısı olarak kullanılan birçok malzeme ile de sağlanabilmektedir [70, 71]. Isı yalıtımının performansı kullanılan malzemenin özelliklerine göre zamanla azalabilmektedir. Bu çalışmanın bir katkısı da binanın ısı yalıtım performansının olası zamanla değişiminin daha kolay, ekonomik ve zararsız biçimde tespitinin sağlanmasıdır. Binaların ısı kaybına daha fazla yol açan kısımlarının tespiti ile hem mikro iklim koşullarına daha uygun yapı tasarımını kolaylaştırıcı veriler sunulabilecektir [72]. Bu sayede ülke bazlı yapılan genel ısıtma ve soğutma ihtiyacı analizlerinin daha doğru ve faydalı biçimde uygulanabilmesi sağlanacaktır [73]. Merkezi ısıtma sistemlerinde ısıtılan su ve buharın iletimi sırasında önemli miktarda ısı kaybı olabilmektedir [74]. Bu çalışmada geliştirilen yöntemin uygulanması sadece üst yapılarla sınırlı olmayıp merkezi ısıtma tesislerinin ısı iletimi borularının işletme durumlarının da takibi ve tespitinde de uygulanabilmektedir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada termal görüntüden yararlanılarak binaların dış cephesinde ortaya çıkan ısı kaybının insan müdahalesi olmadan belirlenmesi amaçlanmıştır. Otsu eşik belirleme algoritması uygulanarak benirizasyon sürecinde gereken eşik değeri belirlenmiştir. Uygulanan kenar belirleme yöntemleri ile elde edilen kenar görüntüleri üzerinden Otsu eşiği ile bina görüntüsü ısı kaybı bölgesi ve ısı kaybı olmayan bölge olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma için Roberts, Sobel, Prewitt, Robinson, Kirsch, Frei-Chen ve modifiyeleri, Laplace ve modifiye edilmiş Laplace ile Canny kenar belirleme operatörü uygulanmıştır. Denenen yöntemler arasında ısı kayıplarını en başarılı biçimde tespit eden yöntem Modiye II Frei Chen 0.5 ve ikinci derece Laplace 0.5'dir. Ayrıca Prewitt 0.5, Sobel 0.5, Robinson 0.5, Modifiye 1 Frei-Chen 0.5, Laplace 0.5 ve Canny 0.25 başarılı sonuçlar sunmuştur. Her görüntü için en uygun sınıflandırma eşiğini hesaplayan Otsu algoritması uygulandığı için bir uzman görüşü sonucu her görüntü için bir eşik değerinin tayin edilmesine gerek kalmamış ve ısı kaybının tespit edilmesi için gereken insan emeği önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular sonucunda mevcut binaların ısı kaybına yol açan kısımları doğru ve hızlı biçimde belirlenebilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünce FBA-2018-1051 kod numaralı proje ile desteklenmiştir. (This study is supported by Inonu University Scientific Research Project Coordinator by the FBA-2018-1051 coded research Project.)

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Önder Halis BETTEMİR: Uygulanan algoritmaların Matlab kodlamasını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Öziç, M.Ü., Ekmekci, H., Özşen, S., Barstuğan, M., ve Yıldoğan, A., "3B T1 ağırlıklı MR görüntülerinde atlas tabanlı hacim ölçüm yöntemini kullanarak alzheimer hastalığının teşhisi", ***Politeknik Dergisi***, 25(1), 47-58, (2022).

[2] İbrahım, M., "WBBA-KM: a hybrid weight-based bat algorithm with K-means algorithm for cluster analysis", ***Politeknik Dergisi***, 25(1), 65-73, (2022).

[3] Wardlaw, J., Gryka, M., Wanner, F., Brostow, G., ve Kautz, J., "A new approach to thermal imaging visualisation", ***EngD Group Project***, University College London, (2010).

[4] Lucchi, E., "Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 82, 3077-3090, (2018).

ERKEN GÖRÜNÜM

[5] Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., ve Kalogirou, S. A., "Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review", ***Applied Energy***, 134, 531-549, (2014).

[6] Mayer, Z., Heuer, J., Volk, R., ve Schultmann, F., "Aerial thermographic image-based assessment of thermal bridges using representative classifications and calculations", ***Energies***, 14(21), 7360, (2021).

[7] Mayer, Z., Kahn, J., Hou, Y., ve Volk, R., "AI-based thermal bridge detection of building rooftops on district scale using aerial images", ***In Proceedings of the EG-ICE 2021 Workshop on Intelligent Computing in Engineering***, Berlin, Germany (Vol. 30), (2021, June).

[8] Hou, Y., Chen, M., Volk, R., ve Soibelman, L., "An approach to semantically segmenting building components and outdoor scenes based on multichannel aerial imagery datasets", ***Remote Sensing***, 13(21), 4357, (2021).

[9] Hou, Y., Volk, R., ve Soibelman, L., "A novel building temperature simulation approach driven by expanding semantic segmentation training datasets with synthetic aerial thermal images", ***Energies***, 14(2), 353, (2021).

[10] Arjoune, Y., Peri, S., Sugunaraj, N., Biswas, A., Sadhukhan, D., ve Ranganathan, P., "An Instance Segmentation and Clustering Model for Energy Audit Assessments in Built Environments: A Multi-Stage Approach", ***Sensors***, 21(13), 4375, (2021).

[11] Pavlović, A., ve Barbarić, Ž., Application of G100/120 thermal imaging camera in energy efficiency measuring in building construction, ***Serbian Journal of Electrical Engineering***, 10(1), 153-164, (2013).

[12] O'Grady, M., Lechowska, A.A., ve Harte, A.M., "Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and Windows", ***Energy and Buildings***, 168, 347-362, (2018).

[13] Kim, C., Choi, J. S., Jang, H., ve Kim, E. J., "Automatic detection of linear thermal bridges from infrared thermal images using neural network", ***Applied Sciences***, 11(3), 931, (2021).

[14] Despotovic, M., Koch, D., Leiber, S., Doeller, M., Sakeena, M., ve Zeppelzauer, M., "Prediction and analysis of heating energy demand for detached houses by computer vision", ***Energy and Buildings***, 193, 29-35, (2019).

[15] Martinez-De Dios, J. R., ve Ollero, A., "Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using UAVs", ***In 2006 world automation congress*** (pp. 1-6). IEEE, (2006, July).

[16] Guerriero, P., ve Daliento, S., "Automatic edge identification for accurate analysis of thermographic images of solar panels", ***In 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP),*** 768-772, IEEE, (2017, June).

[17] Macher, H., Landes, T., ve Grussenmeyer, P. "Automation of Thermal Point Clouds Analysis for the Extraction Of Windows and Thermal Bridges of Building Facades", ***The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences***, 43, 287-292, (2020).

[18] Kakillioglu, B., Velipasalar, S., ve Rakha, T., "Autonomous heat leakage detection from unmanned aerial vehicle-mounted thermal cameras", ***In Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Smart Cameras,*** 1-6, (2018, September).

[19] Rakha, T., Liberty, A., Gorodetsky, A., Kakillioglu, B., ve Velipasalar, S., "Heat mapping drones: an autonomous computer-vision-based procedure for building envelope inspection using unmanned aerial systems (UAS)", ***Technology| Architecture+ Design***, 2(1), 30-44, (2018).

[20] Rakha, T., Liberty, A., Gorodetsky, A., Kakillioglu, B., ve Velipasalar, S., "Campus as a Lab for Computer Vision-based Heat Mapping Drones: A Case Study for Multiple Building Envelope Inspection using Unmanned Aerial Systems (UAS)", (2018).

[21] Taylor, T., Counsell, J., ve Gill, S., "Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building façades", ***Energy and Buildings***, 76, 130-142, (2014).

[22] González-Aguilera, D., Lagueela, S., Rodríguez-Gonzálvez, P., ve Hernández-López, D., "Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades", ***Energy and Buildings***, 65, 29-36, (2013).

[23] Lai, J. H. L., Lin, C. C., Chen, C. F. R., ve Lin, C. Y., "Multi-modality Mobile Image Recognition Based on Thermal and Visual Cameras", ***In 2015 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)***, 477-482, (2015, December).

[24] Lewandowski, W. M., Ryms, M., ve Denda, H., "Quantitative study of free convective heat losses from thermodynamic partitions using Thermal Imaging", ***Energy and Buildings***, 167, 370-383, (2018).

[25] Rakha, T., ve Gorodetsky, A., "Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones", ***Automation in Construction***, 93, 252-264, (2018).

[26] Nikzad, S., Kari, B. M., ve Tahmasebi, F., "The application of thermal imaging as a nondestructive test in historic buildings", ***XII DBMC***, Porto, Portugal, (2011)..

[27] Ostańska, A., "Thermal imaging for detection of defects in envelopes of buildings in use: qualitative and quantitative analysis of building energy performance", ***Periodica Polytechnica Civil Engineering***, 62(4), 939-946, (2018).

[28] Garrido, I., Lagüela, S., Arias, P., ve Balado, J., "Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings", ***Energy and Buildings***, 158, 1358-1367, (2018).

[29] White, J. M., and Rohrer, G. D. "Image thresholding for optical character recognition and other applications requiring character image extraction", ***IBM Journal of research and development***, 27(4), 400-411, (1983).

[30] Chow, C.K. ve Kaneko, T., "Automatic boundary detection of the left ventricle from cineangiograms", ***Computers and biomedical research***, 5(4), 388-410, (1972).

[31] Taxt, T., Flynn, P.J. ve Jain, A.K., "Segmentation of document images", ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 11(12), 1322-1329, (1989).

ERKEN GÖRÜNÜM

[32] Mardia, K.V. ve Hainsworth, T.J., "A spatial thresholding method for image segmentation", ***IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence***, 10(6), 919-927, (1988).

[33] Parker, J.R., "Gray level thresholding in badly illuminated images", ***IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence***, 13(08), 813-819, (1991).

[34] Yanowitz, S.D. ve Bruckstein, A.M., "A new method for image segmentation", ***Computer Vision, Graphics, and Image Processing***, 46(1), 82-95, (1989).

[35] Trier, Ø.D., Jain, A.K., ve Taxt, T., "Feature extraction methods for character recognition-a survey", ***Pattern recognition***, 29(4), 641-662, (1996).

[36] Cheriet, M., Said, J.N., ve Suen, C.Y., "A recursive thresholding technique for image segmentation", ***IEEE transactions on image processing***, 7(6), 918-921, (1998).

[37] Bradley, D., ve Roth, G., "Adaptive thresholding using the integral image", ***Journal of graphics tools***, 12(2), 13-21, (2007).

[38] Sezgin, M., ve Sankur, B., "Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation", ***Journal of Electronic imaging***, 13(1), 146-165, (2004).

[39] Kittler, J., ve Illingworth, J., "Minimum error thresholding", ***Pattern recognition***, 19(1), 41-47, (1986).

[40] Kittler, J., ve Illingworth, J., "On threshold selection using clustering criteria", ***IEEE transactions on systems, man, and cybernetics***, (5), 652-655, (1985).

[41] Shafait, F., Keysers, D., ve Breuel, T. M., "Efficient implementation of local adaptive thresholding techniques using integral images", ***In Document recognition and retrieval XV SPIE***, 6815, 317-322, (2008, January).

[42] Sauvola, J., ve Pietikäinen, M., "Adaptive document image binarization", ***Pattern recognition***, 33(2), 225-236, (2000).

[43] Su, B., Lu, S., ve Tan, C. L., "Robust document image binarization technique for degraded document images", ***IEEE transactions on image processing***, 22(4), 1408-1417, (2012).

[44] Trier, Ø.D., ve Taxt, T., "Evaluation of binarization methods for document images", ***IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence***, 17(3), 312-315, (1995).

[45] Trier, Ø.D. ve Jain, A.K., "Goal-directed evaluation of binarization methods", ***IEEE transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence***, 17(12), 1191-1201, (1995).

[46] Niblack, W., "An introduction to digital image processing", ***Strandberg Publishing Company***, (1985).

[47] Balaha, H.M., Ali, H.A., ve Badawy, M., "Automatic recognition of handwritten Arabic characters: a comprehensive review", ***Neural Computing and Applications***, 33(7), 3011-3034, (2021).

[48] Kang, S., Iwana, B. K., ve Uchida, S. "Complex image processing with less data—Document image binarization by integrating multiple pre-trained U-Net modules", ***Pattern Recognition***, 109, 107577, (2021).

[49] Bhowmik, S., Sarkar, R., Das, B., ve Doermann, D., "GiB: a Game theory Inspired Binarization technique for degraded document images", ***IEEE Transactions on Image Processing***, 28(3), 1443-1455, (2018).

[50] Qureshi, R., Uzair, M., Khurshid, K., ve Yan, H., "Hyperspectral document image processing: Applications, challenges and future prospects", ***Pattern Recognition***, 90, 12-22, (2019).

[51] Bettemir, Ö.H., "Bazı Yerel Benirizasyon Yöntemleri ile Binalarda Isı Kaybına Yol Açan Kısımların Belirlenmesi", ***Anatolian Journal of Computer Sciences***, 5(1), 22-30, (2020).

[52] Cheremkhin, P. A., ve Kurbatova, E. A., "Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarisation of off-axis digital holograms", ***Optics and Lasers in Engineering***, 115, 119-130, (2019).

[53] Cheremkhin, P.A. Kurbatova, E.A., Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., Rodin, V.G., Starikov, R.S., "Adaptive Digital Hologram Binarization Method Based on Local Thresholding, Block Division and Error Diffusion", ***Journal of Imaging***, 8(2), 15, (2022).

[54] Uçkan, T., Cengiz, H. ve Karci, A., "SSC: Clustering of Turkish texts by spectral graph partitioning". ***Politeknik Dergisi***, 24(4), 1433-1444, (2021).

[55] Bayram, F., "Derin öğrenme tabanlı otomatik plaka tanıma", ***Politeknik Dergisi***, 23(4), 955-960, (2020).

[56] Cherri, A.K., ve Karim, M.A. "Optical symbolic substitution: edge detection using Prewitt, Sobel, and Roberts operators", ***Applied Optics***, 28(21), 4644-4648, (1989).

[57] Kanopoulos, N., Vasanthavada, N. ve Baker, R.L., "Design of an image edge detection filter using the Sobel operator", ***IEEE Journal of solid-state circuits***, 23(2), 358-367, (1988).

[58] Abdou, I.E., ve Pratt, W.K., "Quantitative design and evaluation of enhancement /thresholding edge detectors", ***Proceedings of the IEEE***, 67(5), 753-763, (1979).

[59] Robinson, G.S., "Edge detection by compass gradient masks", ***Computer graphics and image processing***, 6(5), 492-501, (1977).

[60] Patel, B., Maheshwari, R.P., ve Raman, B., "Compass local binary patterns for gender recognition of facial photographs and sketches", ***Neurocomputing***, 218, 203-215, (2016).

[61] Frei, W. ve Chen, C.C., "Fast boundary detection: A generalization and a new algorithm", ***IEEE Transactions on computers***, 100(10), 988-998, (1977).

[62] Feng, Y., Zhang, J., ve Wang, S., "A new edge detection algorithm based on Canny idea", ***In AIP Conference Proceedings AIP Publishing LLC***, 1890(1), 040011, (2017, October).

[63] Park, R. H., "One-dimensional frequency domain interpretation of compass roof edge and Frei–Chen line masks", ***Pattern recognition letters***, 20(3), 281-284, (1999).

[64] Van Vliet, L. J., Young, I. T., ve Beckers, G. L., "An edge detection model based on non-linear laplace filtering", ***In Machine Intelligence and Pattern Recognition***, (7), 63-73, (1988).

ERKEN GÖRÜNÜM

[65] Qu, Z., ve Zhang, L., "Research on image segmentation based on the improved Otsu algorithm", ***In IEEE Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics***, (2), 228-231, (2010, August).

[66] Trier, Ø. D., ve Taxt, T., "Improvement of "integrated function algorithm" for binarization of document images", ***Pattern Recognition Letters***, 16(3), 277-283, (1995).

[67] Ding, L., ve Goshtasby, A., "On the Canny edge detector", ***Pattern recognition***, 34(3), 721-725, (2001).

[68] Rong, W., Li, Z., Zhang, W., ve Sun, L., An improved CANNY edge detection algorithm. ***In 2014 IEEE international conference on mechatronics and automation***, 577-582, (2014, August).

[69] Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms", ***IEEE transactions on systems, man, and cybernetics***, 9(1), 62-66, (1979).

[70] Bostancı, L., "Atık Cam Tozu İçeren Alkali–Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal Yalıtkanlık ve Mikro Yapı Özellikleri", ***Politeknik Dergisi***, 25(1), 75 - 87.

[71] Kaplan, G., Aruntaş, H. Y., "XPS yalıtımlı dış duvarların ısıl performanslarının deneysel incelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, 24(2), 645-653, (2021).

[72] Manav, A. Değişen mikro iklim koşullarında geleneksel konutların enerji etkin davranışları: geleneksel Mut evlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi. ***Politeknik Dergisi***, 24(3), 1137-1149.

[73] Sözen, A., Menlik, T, Anvari-Moghaddam, A. "Mapping of Turkey's district heating/cooling requirements", ***Politeknik Dergisi***, 23(3), 867-878, (2020).

[74] Kon O, İlhan, U., "Merkezi Isıtma Sistemlerinde Yerüstü ve Yeraltı Ön Yalıtımlı Boruların Optimum Yalıtım Kalınlığı, Enerji Tasarrufu ve Yakıt Emisyon Hesabı" ***Politeknik Dergisi***, 25(1): 189-203, (2022).

ERKEN GÖRÜNÜM