

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PARÇALANMIŞ 2B NESNELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ YÖNTEMLERLE
YENİDEN OLUŞTURULMASI**

DOKTORA TEZİ

Seçkin YILMAZ

TEMMUZ 2019
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PARÇALANMIŞ 2B NESNELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ YÖNTEMLERLE
YENİDEN OLUŞTURULMASI**

Bil. Yük. Müh. Seçkin YILMAZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.06.2019
Tezin Savunma Tarihi : 11.07.2019**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vasif NABİYEV

Trabzon 2019

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında

Seçkin YILMAZ Tarafından Hazırlanan

**PARÇALANMIŞ 2B NESNELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ YÖNTEMLERLE
YENİDEN OLUŞTURULMASI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 /06/2019 gün ve 1808 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

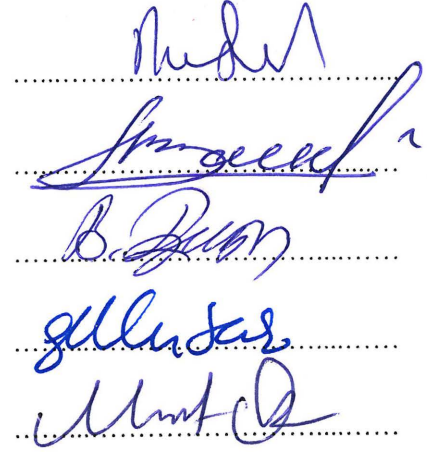
Başkan : Prof.Dr. Rifat YAZICI

Üye : Prof.Dr. Vasif NABIYEV

Üye : Doç.Dr. Burhan ERGEN

Üye : Doç.Dr. Güzin ULUTAŞ

Üye : Dr.Öğr. Üyesi Mehmet ÖZTÜRK


.....
.....
.....
.....
.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Parçalanmış 2B (boyutlu) nesnelere yeniden oluşturulması; büyük ölçekli yapboz problemleri olarak görülmekte ve adli tıp, restorasyon, espionaj faaliyetleri ve multimedya uygulamaları gibi birçok farklı alanı ilgilendirmektedir. Yapboz problemlerinin genel çözüm karmaşıklığı NP-Tam (Deterministik olmayan polinomial tam) sınıfındadır. Problem, kombinator yapıya sahip olduğundan parça sayısının arttığı durumlarda çözümlenme süresi, üssel olarak büyümektedir. Ayrıca nesne parçalarının kenarlarının tahribatlı olması, kenar çeşitliliğinin belirli olmaması vb. alt problemlerden dolayı problemlerin çözümlenme karmaşıklığı daha da artmaktadır. Ayrıca farklı tip nesnelere (belge, banknot, fresk vb.) yeniden oluşturma süreçleri, kendine özgü oldukça zorlayıcı farklı alt problemler içermektedir. Bu nedenle parçalanmış nesnelere aslına uygun bir şekilde yeniden oluşturulması, yoğun bir çalışma gerektirmekte ve çok uzun zaman almaktadır.

Tezde yapboz problemleri kapsamlı bir araştırma sonucunda sınıflandırılarak sistematik bir hâle getirilmiştir. Çalışmada parçalanmış 2B nesnelere bilgisayar desteğiyle daha hızlı ve daha az hatayla yeniden oluşturan bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan yeniden oluşturma sisteminin kapsamı, söz konusu sınıflandırma üzerinden ortaya konmuştur. Bu çalışmada parçalanmış nesnelere bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulmasında karşılaşılan alt problemlerin çözülmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Doktora tez çalışması süresince bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Vasif NABİYEV'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan sevgili aileme, anlayış, sabır ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Seçkin YILMAZ
Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Parçalanmış 2B Nesnelerin Bilgisayar Destekli Yöntemlerle Yeniden Oluşturulması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Vasif NABIYEV’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

11/07/2019

Seçkin YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. 2B Yapboz Problemlerinin Temel Karakteristik Özellikleri	3
1.3. 2B Yapboz Problemlerinin Genel Sınıflandırılması.....	6
1.3.1. Birden Fazla Çözüm Sonucuna Sahip Yapboz Problem Türleri	7
1.3.1.1. Parçalanmış (Dissection) Yapbozlar.....	7
1.3.1.2. Kombinator Yapbozlar	8
1.3.2. Tek Çözüm Sonucuna Sahip Yapboz Problem Türleri.....	9
1.4. Tezin Kapsamı	11
1.5. Yapboz Problemlerinin Bilgisayar Destekli Sistemler ile Çözülmesi.....	12
1.5.1. Problem Çözümünde Referans Görüntü Kullanmayan Bilgisayar Destekli Sistemler	17
1.5.1.1. Şekil Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler	18
1.5.1.2. İçerik Bilgisayar Destekli Sistemler	19
1.5.1.3. Şekil ve İçerik Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler	21
1.5.2. Problem Çözümünde Referans Görüntü Kullanan Bilgisayar Destekli Sistemler	23
1.5.2.1. Örüntü Tanıma Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistem	24
1.5.2.2. Anahtar Nokta Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler.....	25
1.6. Bilgisayar Destekli Sistemlerin İlgili Oldukları Alanlara Göre Değerlendirilmesi	31
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
2.1. Geliştirilen Bilgisayar Destekli Sistem.....	39
2.1.1. Veri setinin Oluşturulması.....	39

2.1.1.1.	Gerçek Veri Setleri	39
2.1.1.2.	Sentetik Veri setleri	46
2.1.2.	Eşleştirme İşlemi	48
2.1.2.1.	Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemler	49
2.1.2.1.	Blok Tabanlı Yöntemler	54
2.1.3.	Global Tutarlılığın Sağlanması.....	60
2.1.4.	Çıkış Görüntülerinin Elde Edilmesi (Parçaların Bir Araya Getirilmesi).....	63
2.2.	Parçalanmış Nesnelerin Yeniden Oluşturulma Süreçlerinin Hızlandırılması	82
2.3.	Yeniden Oluşturma Sonuçlarının İlgili Oldukları Alana Göre Değerlendirmesi.....	96
3.	BULGULAR VE İRDELEME	104
3.1.	Geliştirilen Bilgisayar Destekli Sistem ile Parçalanmış Nesnelerin Yeniden Oluşturulması	105
3.1.1.	Giriş Görüntülerinin (Parçaların) Yüklenmesi	105
3.1.2.	Eşleştirme İşlemi	105
3.1.3.	Global Tutarlılığın Sağlanması.....	115
3.1.4.	Çıkış Görüntülerinin Elde Edilmesi (Parçaların Bir Araya Getirilmesi).....	116
3.2.	Geliştirilen Ön Gruplama Yöntemi ile Problem Çözümünün Hızlandırılması	132
3.3.	Yeniden Oluşturma Sonuçlarının İlgili Oldukları Alana Göre Değerlendirmesi.....	138
4.	SONUÇLAR.....	142
5.	ÖNERİLER.....	144
6.	KAYNAKLAR.....	146
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

PARÇALANMIŞ 2B NESNELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ YÖNTEMLERLE YENİDEN
OLUŞTURULMASI

Seçkin YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Vasif V. NABİYEV
2019, 155 Sayfa

Bu çalışmada çok şekilli olarak parçalanmış 2B nesnelerin bilgisayar desteğiyle daha hızlı ve daha az hatayla yeniden oluşturulması amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Önerilen sistemde parçalanmış nesnelere ile ilgili referans görüntüler kullanılmıştır. Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturma süreci, oldukça zorlayıcı alt problemler içerdiğinden alt aşamalara ayrılarak irdelenmiş ve literatüre çeşitli katkılar yapılmıştır. İlk aşamada ele alınan problemlerle ilgili İnternet ortamında veri setleri bulunmadığından kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. Parçaların referans görüntüler ile eşleştirilme aşamasında anahtar nokta tabanlı SIFT, SURF, BRISK ve AKAZE yöntemleri karşılaştırılmıştır. Önerilen Borda sayısına dayalı yaklaşım ile eşleştirme aşamasında AKAZE yönteminin kullanılmasına isabetli bir şekilde karar verilmiştir. Ayrıca anahtar nokta tabanlı yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlar için Zernike momente dayalı blok tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Parçaların hizalanma problemleri için minimum kapalı çevrim tabanlı alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Parçalara ait piksellerin belirlenmesi aşamasında önerilen CIELAB renk uzayı tabanlı yaklaşım ile tarayıcılardan kaynaklanan renk problemlerinin üstesinden gelinmiştir. Çoklu yeniden oluşturma işlemlerinde parçaların kenar ve renk bilgilerinin benzerliklerini dikkate alan yaklaşım ile global tutarlılık sağlanmıştır. Ayrıca nesnelere ait parçaları kendi içlerinde gruplandıran bir yöntem ilk kez önerilmiş ve gruplandırma işlemi ile problem çözümünün hızlandırılabileceği ortaya konmuştur. Önerilen yeniden oluşturma sisteminde yüksek başarı oranında sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapboz problemlerinin bilgisayar destekli çözümü, Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması, Parçaların bir araya getirilmesi, 2B görüntülerin bir araya getirilmesi, parçaların gruplandırılması.

PhD. Thesis

SUMMARY

RECONSTRUCTION OF FRAGMENTED 2D OBJECTS WITH COMPUTER AIDED
METHODS

Seçkin YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof.Dr. Vasıf NABIYEV
2019, 155 Pages

In this study, a system is designed to reconstruct multi-fragmented 2D objects with faster and less errors with the computer aided. In the proposed system, the reference images related to fragmented objects are used. Since the reconstruction process of fragmented objects contains quite challenging sub-problems, it is divided into sub-stages and various contributions are made to the literature. In the first stage, since there are no datasets on the İnternet, a comprehensive dataset is created. At the stage of matching the pieces with reference images, the keypoint based SIFT, SURF, BRISK and AKAZE methods are compared. Owing to the proposed Borda count based approach, AKAZE method is decided to use at the matching stage. Also, a block based method that used Zernike moments is developed for sub-problems where keypoint based methods are insufficient. An alternative method based on minimum convex hull is developed for the problem of alignment of pieces. At the determination of the pixels of the pieces, the CIELAB color space based approach is proposed to overcome the color problems arising from the scanners. Global consistency are achieved by approach that takes into account the edges and color information similarities of the pieces at the multiple reconstruction process. In addition, a method that grouped the pieces of the 2D objects within themselves is proposed for the first time and it is shown that the problem solving can be accelerated by grouping process.

Key Words: Solution of the puzzle problems with computer aided methods, Reconstruction of fragmented 2D objects, Fragments assembling, Assembling 2D images, Grouping of pieces.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	(a) Parçalanmış tarihi arşiv dokümanları [1, 2019] (b) Zarar görmüş banknotlar [2, 2019] (c) Parçalanmış Stasi belgeleri [3, 2019] (d) Suriye’de DAEŞ tarafından yıkılmış Palmira antik kenti [6, 2019]	1
Şekil 1.2.	Resimsiz klasik yapboz parçalarının kenarlarının eşleştirilmesi ile (a) hatalı (b) doğru sonucun elde edilmesi [16].....	4
Şekil 1.3.	(a) Belge parçalarının şekil yapıları (b) Parçaların birbirleriyle eşleştirilmesi [17].....	5
Şekil 1.4.	2B yapboz problemlerinin genel sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.5.	Farklı formların oluşturulması (a) ve (b) dört parçanın bir araya getirilmesi (c) bir materyalin kesilmesi ile tangram parçalarının oluşturulması (d)-(f) tangram parçalarından farklı figürlerin oluşturulması.....	8
Şekil 1.6.	(a)- (b) Polyomino yapboz problemlerinde elde edilen sonuçlar [29].	9
Şekil 1.7.	(a) Eternity yapboz [33, 2019] (b) Parçalanmış bir nesne [34] (c) Kenar eşleştirmeli bir yapboz [10] (d) Kâğıt parçalayıcı ile parçalanmış belge [35] (e) Klasik bir yapboz problemi [36] (f) Parçalanmış bir fotoğraf [37] (g) Parçalanmış banknot [38].....	10
Şekil 1.8.	Parçalanmış nesnelere ilgili indeksli dergilerde yapılan yayın sayıları (a) belgeler (b) freskler [59].....	13
Şekil 1.9.	Bilgisayar destekli sistemlerin genel sınıflandırılması.....	14
Şekil 1.10.	Referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı	17
Şekil 1.11.	Referans görüntü kullanan bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı	23
Şekil 1.12.	Fresk parçalarının referans görüntüdeki konumlarının belirlenmesi [18].....	25
Şekil 1.13.	1000 Yeni Taylan (NT) dolarına ait (a) referans görüntü (b) SIFT yöntemi ile referans görüntüde tespit edilen anahtar noktalar	27
Şekil 1.14.	SIFT yöntemi tabanlı parça ile referans görüntünün eşleştirilmesi [76].	27
Şekil 1.15.	RANSAC yöntemi ile global tutarlılığın sağlanması [76].	28
Şekil 1.16.	(a) Referans banknot (b) rotasyona uğramış parça (c) parçanın hizalanarak boş çerçeveye yerleştirilmesi [51]	29
Şekil 1.17.	(a) Sağlam bir banknotun ızgara yapısındaki bir alana yerleştirilmesi (b) tahribata uğratılmış bir banknotun ızgara alanına yerleştirilmesi (c) içi tam dolu olmayan karelerin tespit edilmesi [86].	33
Şekil 2.1.	(a) Ortofoto (orthophoto) olarak çekilmiş bir sanat eseri [91] (b) Lazer tarayıcılarla İtalya’da bir eserin fotoğraflanması [93].....	37

Şekil 2.2.	(a) Referans bilet (b) Kyocera UTAX 5555i (c) Brother dcp-j105 markalı tarayıcılar ile parçaların dijital hale getirilmesi	40
Şekil 2.3.	(a) Referans kartpostal (b) kartpostal parçalarının dijital hale getirilmesi.....	41
Şekil 2.4.	(a) Parçalanmış fotoğraf ile ilgili referans görüntü (b) fotoğraf parçalarının dijital hale getirilmesi.....	42
Şekil 2.5.	Parçalanmış banknotun (a) ön (b) arka yüzüne referans görüntüleri (c) banknot parçalarının dijital hale getirilmesi.....	43
Şekil 2.6.	(a) ve (c) Referans banknotlar (b) ve (d) verisetindeki banknotların parçalanmadan önceki görüntüleri (e) referans bilet (f) verisetindeki bir biletin parçalanmadan önceki görüntüsü	44
Şekil 2.7.	Parçaların kenarlarında oluşan tahribatlar.....	45
Şekil 2.8.	(a) Bir banknot parçası (b)- (d) düşük doku özelliğine sahip fotoğraf parçaları.....	46
Şekil 2.9.	(a) Bir freskin parçalanmadan önceki hali [108, 2019] (b) freske ait parçalar	47
Şekil 2.10.	(a) ve (b) Referans banknotun (a) ön (b) arka yüzü, parçalanmış banknotun (c) ön (d) arka yüzü (e) sentetik oluşturulan parçalar	48
Şekil 2.11.	Bir imgenin 4x4 büyüklüğünde örtüşen alt bloklara ayrılması	55
Şekil 2.12.	Zernike momentte radyal polinom $n=7$ derecesi alındığında elde edilen (a) gerçek (b) sanal kısımlar [117].	59
Şekil 2.13.	(a) Bir banknot parçasının (a) arka (b) ön yüzüne ait referans görüntü ile AKAZE yöntemi kullanılarak eşleştirilmesi (c) RANSAC yöntemi hatalı eşleşen anahtar noktaların tespit edilmesi	61
Şekil 2.14.	(a) Blok tabanlı yöntem kullanılarak bir kartpostal parçasının referans görüntü ile eşleştirilmesi (b) RANSAC yöntemi ile hatalı sonuçların elenmesi.....	62
Şekil 2.15.	Minimum kapalı çevrimin hesaplanması	64
Şekil 2.16.	Referans banknot ile parça arasında doğru eşleşen anahtar noktalara minimum kapalı çevrimin uygulanması	64
Şekil 2.17.	Bir parçanın minimum kapalı çevrim üzerinden rotasyon açısının hesaplanması	66
Şekil 2.18.	Minimum çevrimlerin uygulanması sonucu oluşan geometrik şekillerin birbirleri ile karşılaştırılması	68
Şekil 2.19.	Renk uzaylarının cihaz bağımlılıklarına göre sınıflandırılması [81].	70
Şekil 2.20.	(a) Parça görüntüsü (b) CIELab renk modeli yardımıyla parça görüntüsünün ikili seviye dönüştürülmesi (c) boşlukların doldurulması (d) gürültülerin giderilmesi	71
Şekil 2.21.	(a) Referans görüntü (b) bir parçanın boş bir çerçeveye yerleştirilmesi	72

Şekil 2.22.	Parçalanmış bir banknotun (a) ön (b) arka yüzüne ait referans görüntü (c) ön yüzü (d) arka yüzü taratılan parçaların çerçeveye yerleştirilmesi.....	73
Şekil 2.23.	(a) Arka yüze ait referans görüntü (b) bir parçanın ilgili konuma göre arka yüz çerçeveye yerleştirilmesi (c) ön yüz referans görüntüde bir parçanın ait olabileceği konum (d) parçanın ön yüz çerçeveye yerleştirilmesi (e) tüm parçaların çerçeveye yerleştirilmesi	74
Şekil 2.24.	(a) Ön yüz çerçeveye yerleştirilmiş parçalar (b) arka yüz çerçeveye yerleştirilmiş parçalar (c) ön yüze göre parçaların yeniden bir araya getirilmesi.....	76
Şekil 2.25.	(a) 2 nolu parça (b) ön (c) arka çerçeveye yerleştirilen parçalar.....	76
Şekil 2.26.	(a) 3 nolu parça, (b) 4 nolu parça (c) ön (d) arka çerçevedeki son durum	79
Şekil 2.27.	Douglas Peucker algoritması ile çizgi basitleştirme işlemi.....	81
Şekil 2.28.	(a) Çakışma olan (b) global tutarlılığın sağlayan parça çifti (c) parça çiftinin birleştirilmesi	82
Şekil 2.29.	Önerilen gruplama yönteminin akış diyagramı	83
Şekil 2.30.	(a) Bir paraya ait görüntü (b) CIELab renk modeli tabanlı yaklaşım ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi (c) görüntünün düzlemler üzerinde incelenmesi (d) parça sınırlarının çıkarılması	84
Şekil 2.31.	(a) x-y düzlemi (b) parametre uzayı.....	85
Şekil 2.32.	(a) xy düzlemindeki çizginin (ρ , θ) parametreleri ile gösterimi (b) $\rho\theta$ düzlemindeki sinüs biçimli eğriler (c) $\rho\theta$ düzleminin akümülatör hücrelere bölünmesi	86
Şekil 2.33.	(a) Tahribata uğramış bir banknot parçası (b) banknot parçasının sınırlarında düz çizgilerin tespiti (c) bir kartpostala ait parça (d) kartpostal parçasının sınırlarında düz çizgilerin tespiti.....	87
Şekil 2.34.	Bir parçanın sınırlarında bulunan düz çizgiler	88
Şekil 2.35.	(a) Parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanması (b) parça sınırlarının dört bölgeye ayrılıp düz çizgilerin konveks kenarlar ile karşılaştırılması	89
Şekil 2.36.	(a) Bir parça görüntüsü (b) parça sınırlarında Hough Dönüşümün uygulanması (c) kapalı çevrimin uygulanması (d) aykırı düz çizgilerin elenmesi.....	90
Şekil 2.37.	Çizgilerin gruplandırılması (a) ayırık (b) iç içe geçen düz çizgiler	91
Şekil 2.38.	(a) Parça (b) Hough dönüşüm ile tespit edilen düz çizgiler (c) sınırlara kapalı çevrim uygulanması (d) geçerli ayırık düz çizgilerin birleştirilmesi.....	92
Şekil 2.39.	Parçaların elde edilen nihai sonuçlara göre etiketlenmesi	93
Şekil 2.40.	(a) Kartpostal parçası (b) parçanın şekil özelliğinin çıkarılması (c) parçanın hizalanması	94

Şekil 2.41.	Parçanın referans görüntüde yalnızca köşe bölgeler ile eşleştirilmesi.....	95
Şekil 2.42.	(a) Orta parçaların yerleştirileceği bölgenin çıkarılması (b) orta parçanın referans görüntü ile eşleştirilmesi.....	96
Şekil 2.43.	(a) Banknot parçasının kenarındaki eksilme (b) banknot (c) kartpostal parçasının kenarlarındaki soyulamalar.....	97
Şekil 2.44.	Geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulmuş bir banknot.....	98
Şekil 2.45.	(a) Orijinal (b) zarar görmüş bir görüntü (c) örnek tabanlı iç boyama yöntemi ile onarılma aşamalarından bir görüntü (d) onarılma işlemi tamamlanmış görüntü [122].	100
Şekil 2.46.	(a) İmgede yama alınacak ve doldurulacak bölgeler (b) doldurma işlemine başlanması (c) örnek yamanın seçilmesi (d) doldurma işleminin gerçekleştirilmesi [122].	100
Şekil 2.47.	Güven ve veri teriminde kullanılan notasyonlar [122].	101
Şekil 3.1.	(a) Geliştirilen bilgisayar destekli sistemin görsel arayüzü (b) bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulan bir nesnenin görüntüsü.....	104
Şekil 3.2.	(a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın AKAZE yöntemi kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi.....	109
Şekil 3.3.	(a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın AKAZE yöntemi kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi.....	110
Şekil 3.4.	(a) ve (b) Düşük doku özelliğine sahip parçalar (c) referans görüntü (d) ve (e) AKAZE yöntemi ile parçaların eşleştirilmesi	111
Şekil 3.5.	(a) ve (b) Hu moment (c) ve (d) Zernike moment kullanılarak parçaların referans görüntü ile eşleştirilmesi	112
Şekil 3.6.	(a) Hu (b) Zernike moment kullanılarak yapılan blok tabanlı yeniden oluşturma işlemleri.....	113
Şekil 3.7.	(a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın Zernike moment tabanlı yöntem kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi	114
Şekil 3.8.	Zernike momentte yineleme sayısı 15 yapılarak bir parçanın referans görüntü ile eşleştirilmesi	115
Şekil 3.9.	Hatalı eşleşmelerin elenmesi (a) ve (b) AKAZE yöntemi ile anahtar nokta tabanlı (c) ve (d) Zernike moment ile blok tabanlı elde edilen sonuçlar	116
Şekil 3.10.	2000 Yuan'a ait sentetik parçalar.....	117
Şekil 3.11.	5 nolu parçanın rotasyon açısının hesaplanması için geometrik şekillerin karşılaştırılması	117
Şekil 3.12.	1 YTL'ye ait gerçek banknot parçaları	119

Şekil 3.13.	(a) Bir banknot parçası (b) Otsu yöntemi ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi bölütlenmesi (c) boşlukların doldurulması ve gürültülerin giderilmesi (d) önerilen yöntem ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi (e) boşlukların doldurulması ve gürültülerin giderilmesi.....	121
Şekil 3.14.	a) Bir banknota ait parçalar (b) Otsu tabanlı yaklaşım ile elde edilen sonuçlar (c) önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçlar.....	122
Şekil 3.15.	(a) Bir kartpostala ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile tespit edilmesi.....	123
Şekil 3.16.	(a) Bir banknota ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile tespit edilmesi.....	124
Şekil 3.17.	(a) Bir karpostala ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşımla tespit edilmesi.....	124
Şekil 3.18.	(a) Bir magazin sayfasına ait parçalar (b) parça görüntülerinin ikili seviyeye dönüştürülmesi	125
Şekil 3.19.	(a) ve (b) Parçalanmış fresklerin yeniden oluşturulma sonuçları.....	126
Şekil 3.20.	Parçalanmış biletlerin yeniden oluşturulması	127
Şekil 3.21.	Parçalanmış kartpostalların yeniden oluşturulması.....	128
Şekil 3.22.	Parçalanmış fotoğrafların yeniden oluşturulma sonuçları.....	129
Şekil 3.23.	Parçalanmış banknotların yeniden oluşturulma sonuçları.....	130
Şekil 3.24.	Aynı tip 4 adet bilete ait parçalar	131
Şekil 3.25.	Parçalanmış 4 adet biletin geliştirilen bilgisayar destekli sistem tarafından yeniden oluşturulması	131
Şekil 3.26.	(a) 250.000 TL'lik bir banknota ait parça görüntüleri (b) parçala kenarlarında Hough tabanlı yaklaşım ile düz çizgilerin tespit edilmesi.....	133
Şekil 3.27.	(a) Parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanması (b) aykırı düz çizgiler elenip ayırık çizgiler birleştirilme sonucu	134
Şekil 3.28.	Parçaların hizalanması.....	135
Şekil 3.29.	(a) Köşe (b) kenar parçanın Zernike moment kullanan blok tabanlı yöntem ile eşleştirilmesi.....	136
Şekil 3.30.	Parçalanmış 250.000 TL'lik banknotun Zernike moment kullanan blok tabanlı yöntem ile yeniden oluşturulması	136
Şekil 3.31.	Parçalanmış nesnelerin blok tabanlı yöntem ile yeniden oluşturma süreleri.....	137
Şekil 3.32.	(a) Referans görüntü (b) Bilgisayar destekli sistem tarafından yeniden oluşturulan bir banknot.....	138
Şekil 3.33.	(a) Orijinal fresk (b) Reprodüksiyonu yapılmış fresk	139
Şekil 3.34.	(a) Yeniden oluşturulan fresk (b) Reprodüksiyonu yapılmış görüntüden faydalanarak yeniden oluşturulmuş freskin onarılması	140

Şekil 3.35. Yeniden oluşturulan freskin içboyama yöntemi kullanılarak onarılması..... 141



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Bilgisayar destekli sistemler ile çözülmeye çalışılan bazı yapboz problem türleri.....	15
Tablo 2.1. Banknotların referans görüntüler ile eşleştirilmesi	53
Tablo 2.2. Doğruluk yüzdelerinin Borda skorlarına dönüştürülmesi	54
Tablo 3.1. Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemler Kullanılarak Banknotların Referans Görüntüler ile Eşleştirilmesi	106
Tablo 3.2. Doğruluk yüzdelerinin borda yöntemine göre puanlanması	107
Tablo 3.3. AKAZE yöntemi kullanılarak parçalar ile referans görüntülerin eşleştirilmesi.....	108
Tablo 3.4. 2000 Yuan'a ait parçaların rotasyon açısı tahmin sonuçlarının karşılaştırılması	118
Tablo 3.5. 2000 Yuan'a geniş açı ile döndürülen bazı parçaların açı rotasyon tahmin sonuçları	119
Tablo 3.6. 1 YTL'ye ait gerçek parçalar için rotasyon açısı tahmin sonuçları	120
Tablo 3.7. Çoklu yeniden oluşturma probleminin bilgisayar desteği olmadan çözüm süreleri	132
Tablo 3.8. Parçaların kendi içlerinde gruplandırılması	135
Tablo 3.9. Blok tabanlı olarak parçaların yeniden oluşturma süreleri.....	137
Tablo 3.10. Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasının önerilen yaklaşım ile değerlendirilmesi	139

SEMBOLLER DİZİNİ

SNR	: İşaret Gürültü Oranını (Signal Noise Ratio)
SIFT	: Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform)
SURF	: Hızlandırılmış Dayanıklı Özellikler (Speeded Up Robust Features)
BRISK	: İkili Sağlam Değişmez Ölçeklenebilir Temel Noktalar (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)
AKAZE	: Hızlandırılmış KAZE (Accelerated-KAZE)
PSNR	: Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak to signal noise ratio)
MSE	: Ortalama Kareysel Hata (Mean Squared Error)
NP-Tam	: Deterministik olmayan polinomial tam (Non-deterministic-polynomial Time)
RANSAC	: Rastgele Örnek Konsensüsü (Random Sample Consensus)
TP	: Doğru pozitif (True Pozitif)
FP	: Yanlış Pozitif (False Pozitif)
SSD	: Kare farkının toplamı (sum of squared differences)
DARPA	: Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (Defense Advanced Research Projects Agency)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bu tez, parçalanmış 2B (boyutlu) nesnelerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulmasını ele almaktadır.

Nesneler; depremler, sel, kasırgalar gibi doğa felaketlerinden dolayı parçalanabilmektedir. Örneğin 2009 yılında Almanya'nın Köln şehrinde tarihi arşiv kayıtlarının tutulduğu binanın çökmesi sonucu binlerce doküman zarar görmüştür (Şekil 1.1.a) [1, 2019]. Başka bir örnek olay ise 2013 yılında Almanya'da yaşanan sel felaketi sonucunda görülmüştür. Sel felaketi sonucunda birçok banknot zarar görmüş ve bu banknotlar, adli bilim isanlarından oluşan bir ekip tarafından onarılmaya çalışılmıştır (Şekil 1.1.b) [2, 2019]. Nesneler ayrıca terör, savaş ve espionaj faaliyetleri gibi sebeplerden dolayı parçalanabilmektedir. Örneğin 1989 yılında Berlin Duvarı yıkıldıktan sonra Eski Doğu Almanya iç istihbarat servisi Stasi, oluşturdukları binlerce istahbarat belgesini yok etmek amacıyla parçalamıştır (Şekil 1.1.c) [3, 2019]. Başka bir örnek olay ise 2015 yılında terör sebebiyle Irak ve Suriye'de yaşanmıştır. DAEŞ (İŞİD) terör örgütü, Nemrut ve Palmira antik kentlerindeki birçok tarihi eseri parçalamıştır (Şekil 1.1.d) [4, 5 ve 6, 2019].



Şekil 1.1. (a) Parçalanmış tarihi arşiv dokümanları [1, 2019] (b) Zarar görmüş banknotlar [2, 2019] (c) Parçalanmış Stasi belgeleri [3, 2019] (d) Suriye'de DAEŞ tarafından yıkılmış Palmira antik kenti [6, 2019]

Parçalanmış nesnelerin aslına uygun bir şekilde yeniden oluşturulması, yoğun uğraş gerektirmekte ve uzun zaman almaktadır. Örnek olarak Stasi belgelerinin yeniden oluşturulması için Almanya'da bir ekip oluşturulmuştur. Bu ekip tarafından 18 yıldır Stasi belgelerinin yeniden oluşturulmasına uğraşılmış ve bu belgelerin ancak belirli bir kısmı bir araya getirilebilmiştir. Tüm belgelerin elle yeniden oluşturulması için ise birkaç on yıla daha ihtiyaç duyulacağı ön görülmektedir [3, 2019]. Benzer bir örnek olay ise İran'da yaşanmıştır. 1979 yılında İran devrimi sırasında ABD büyükelçiliği basıldığında elçilik görevlileri oluşturdukları istibarat belgelerini yok etmek amacıyla kâğıt parçalayıcılar ile parçalamıştır. Söz konusu belgeler, uzun bir uğraş sonucunda yeniden oluşturulmuş ve İnternette yayınlanarak tüm dünyaya ifşa edilmiştir [7, 2019]. Bazı büyük ölçekli problemler ise çözüme kavuşturulamamıştır. Örneğin Çin'de akıl sağlığı yerinde olmayan bir kadın, 2012 yılında 50 bin Yuan (yaklaşık 7.930 \$) değerindeki yüzlerce banknotu keserek parçalara ayırmıştır. Parçalanmış paralar bankaya götürüldüğünde, 12 banka çalışanı paraları yeniden oluşturmaya çalışmıştır. 6 saat süren çaba sonucunda sadece tek bir banknot eski haline getirilebilmiştir. Bunun üzerine banka görevlileri bu problemin çözülemez olduğuna karar vermişler ve paraları sahibine iade etmişlerdir [8, 2019].

Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasının yoğun çaba gerektirmesi ve uzun zaman almasının nedenlerinden biri problem türünün NP-Tam (Deterministik olmayan polinomial tam) sınıfında olmasıdır. Literatürde parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması, büyük ölçekli yapboz probleminin çözümü olarak görülmektedir [9]. Yapbozların genel çözüm karmaşıklığının NP-Tam sınıfında olduğu Demaine ve Demaine [10] tarafından olduğu ortaya konmuştur. NP-Tam sınıfına ait problemler, kombinator yapıya sahiptir. Yapbozlarda parça sayısının arttığı durumlarda problemin çözümleme süresi, üssel olarak artmaktadır [10]. Bu nedenle büyük ölçekli yapboz problemleri; makul bir sürede sezgisel yaklaşımlar ve yaklaşık çözümleri sağlayan teknikler ile ancak çözülebilmektedir. Örneğin Wolfson ve ark. [11] tarafından klasik yapbozların gezgin satıcı problemi [12] şeklinde ele alınarak çözülebileceği ortaya konmuştur.

Günümüzde yapboz problemlerinin bilgisayar destekli yöntemler ile daha az bir sürede ve az hata ile çözülmesi için çeşitli projeler geliştirilmektedir. Örnek olarak 2007 yılında Alman hükümeti, Fraunhofer Üretim Sistemleri ve Tasarım Teknolojisi Enstitüsü'nde (IPK), Stasi belgelerinin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması için bir proje başlatmıştır. Projede geliştirilen "EPuzzler" olarak adlandırılan sistemi ile Stasi belgelerinin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulmasına çalışılmaktadır [3, 2019].

Benzer bir çalışma 2011 yılında “Shredder Challenge” adı altında DARPA (Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı) tarafından yürütülmüştür. DARPA, İnternette yayınladıkları kâğıt parçalayıcılar ile 5 adet parçalanmış belgenin yeniden oluşturulması için 50.000\$ ödüllü bir yarışma başlatmıştır [13 ve 14, 2019]. San Francisco merkezli bir ekip, geliştirdikleri bilgisayarlı görme tabanlı bir yöntem ile söz konusu dokümanları yeniden oluşturabilmiştir [14, 2019].

2B yapboz problemlerinin çözümlerini zorlu kılan temel faktörler aşağıda açıklanmıştır.

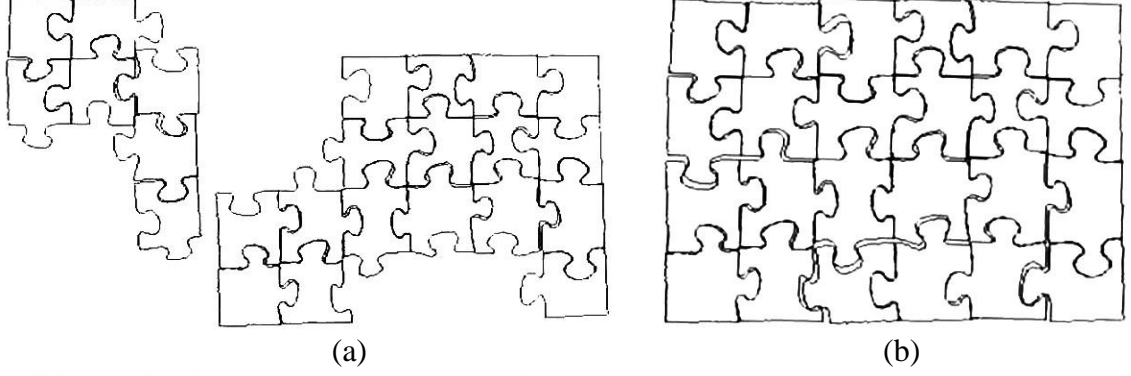
1.2. 2B Yapboz Problemlerinin Temel Karakteristik Özellikleri

2B yapboz problemlerinin bilgisayar destekli olarak çözülmesi ilk defa Freeman ve Garder [15] tarafında 1964 yılında ele alınmıştır. Araştırmacılar, problem çözümünü etkileyen yapbozlarla ilgili 5 temel karakteristik özellik ortaya koymuştur. Söz konusu temel karakteristik özellikler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- 1 Konumlandırma (orientation): Parçaların bir araya getirilme sürecinde uğrıtılacakları rotasyon açıları ile ilgili ön bilgilerdir. Genelde yapboz problemlerinde parçaların rotasyon açıları bilinmemektedir.
- 2 Bağlanabilirlik (connectedness): Parçaların kenar benzerliklerine göre eşleştirilme aşamasında parçalar arasındaki bağlantılarda boşlukların veya problemde eksik parçaların mevcut olması gibi durumlardır.
- 3 Parçaların dış sınır yapıları (exterior boundary): Parçaların şekil yapıları ile ilgili ön bilgilerdir.
- 4 Çözüm aşamasındaki benzersizlik (uniqueness): Parçaların eşleştirilme sürecinde yaşanan belirsizliklerdir.
- 5 Radyallik (radiality): Parçaların birleşme yerleri (bağlantı noktaları) ile ilgili topolojileridir.

Yukarıda belirtilen faktörlerden benzersizliğin (uniqueness) ortaya konması problem çözümünde kritik bir aşamalardan biridir. Çünkü parçaların eşleştirilme işleminde oluşan belirsizlikler problemin çözüm karmaşıklığını arttırmakta ve hatalı sonuçların elde edilmesine yol açmaktadır [16]. Literatürde söz konusu aşama global tutarlılığın sağlanması [17] olarak genel bir isim ile ele alınabilir. Global tutarlılık yaklaşımları ile problem çözümünde geriye dönme (backtracking) işlem maliyeti azaltılmaya

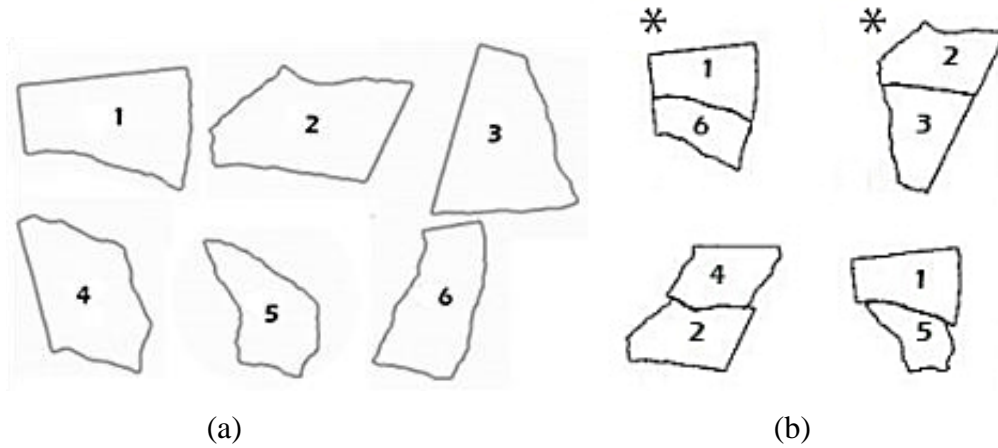
çalışılmaktadır. Örnek olarak Şekil 1.2'deki yapboz probleminin Webster ve ark. [16] tarafından önerilen global tutarlılık yaklaşım ile çözülmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Resimsiz klasik yapboz parçalarının kenarlarının eşleştirilmesi ile (a) hatalı (b) doğru sonucun elde edilmesi [16].

Şekil 1.2.a'da problemin çözümünde yapbozların bütünlüğü dikkate alınmadan yalnızca kenarları eşleşen parçaların biraraya getirilmesi sonucunda elde edilebilecek hatalı sonuçlar gösterilmiştir. Webster ve ark. [16] söz konusu yapboz problemini çözmek için geliştirdiği yöntemde parçalarının sınırlarındaki kritik noktaları tespit etmiştir. Parçalar bu noktalar üzerinden birbirleriyle eşleştirilmiştir. Eşleşme doğruluğunun kontrolü için bir global tutarlılık yaklaşımı geliştirilmiştir. Global tutarlılık yaklaşımında parçaların kenarlarının birbirine kenetlenme (parçaların birleşme yerindeki boşluklar) durumları dikkate alınmıştır. Şekil 1.2.b'de görüldüğü gibi yapboz probleminin çözümü isabetli bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Parçalanmış 2B nesnelere şekil yapıları üzerinden yeniden oluşturulmasında ortaya konulacak global tutarlılık yaklaşımı, geleneksel yapboz problemine göre çok daha sofistike bir yapıya sahiptir. Çünkü ele alınan problemlerde farklı alt problemlerle karşılaşılabilir. Söz konusu durumlardan bazıları: nesnelere ait bazı parçaların eksik olabilmesi, parça şekil çeşitliğinin belirli olmaması, parçaların tahribata uğramış olması ve parça biçimlerinin yapboz parçalarına oranla çok daha kompleks bir yapıya sahip olması şeklindedir. Örnek olarak Zhu ve ark. [17] tarafından parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulmasında önerilen global tutarlılık yaklaşımı Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. (a) Belge parçalarının şekil yapıları (b) Parçaların birbirleriyle eşleştirilmesi [17].

Şekil 1.3'te Zhu ve ark. [17] belge parçalarının kenarlarını eğri eşleştirme yöntemi kullanılarak eşleştirmiştir. Şekil 1.3.b'de global tutarlılığı sağlayan parçalar * ile gösterilmiştir. Söz konusu aday parça çiftlerinde ortak (eşleşen) kenarların uç noktaları birbirleriyle örtüşmektedir. Bu parça çiftlerinin birleştirilmesi yapıldığı takdirde sonraki aşamalarda yapılacak eşleştirmeler için benzer kenarlara sahip yeni aday parçaların bulunma ihtimalinin yüksek olacağını belirtilmiştir. Şekil 1.3.b'deki diğer aday parça çiftlerinde ise parçaların kenarları lokal (kismi) olarak birbirleriyle eşleşmektedir. Dolayısıyla bu aday parça çiftleri global tutarlılığı sağlamadığı varsayımı yapılmıştır.

Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında tahribatların fazla olması veya eksik parçaların olması durumunda problemin çözümü oldukça zorlaşmaktadır. Bu nedenle global tutarlılık yaklaşımının ortaya konmasında farklı stratejiler kullanılabilir. Örneğin II. Dünya savaşında İtalya'da bombalanma sonucunda Rönesans dönemine ait freskler (duvar resimlerinin) binlerce parçaya ayrılmıştır. Söz konusu büyük ölçekli problemin bilgisayar destekli olarak çözülmesi için Fornasier ve Toniolo [18] tarafından bir çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar, parçaların kenar yapıları üzerinden gerçekleştirilecek yeniden oluşturma işlemlerinin başarılı sonuç vermesinin imkânsız olacağını belirtmiştir. Bu nedenle, sanat eserlerinin önceki yıllarda (1900-1920) çekilmiş fotoğrafları elde edilmiştir. Parçalar ile referans fotoğraflar eşleştirilerek problem çözülmeye çalışılmıştır.

Nesnelerin parçalanma biçimine göre ortaya konacak global tutarlılık yaklaşımı farklılık göstermektedir. Örneğin kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış belgelerin yeniden

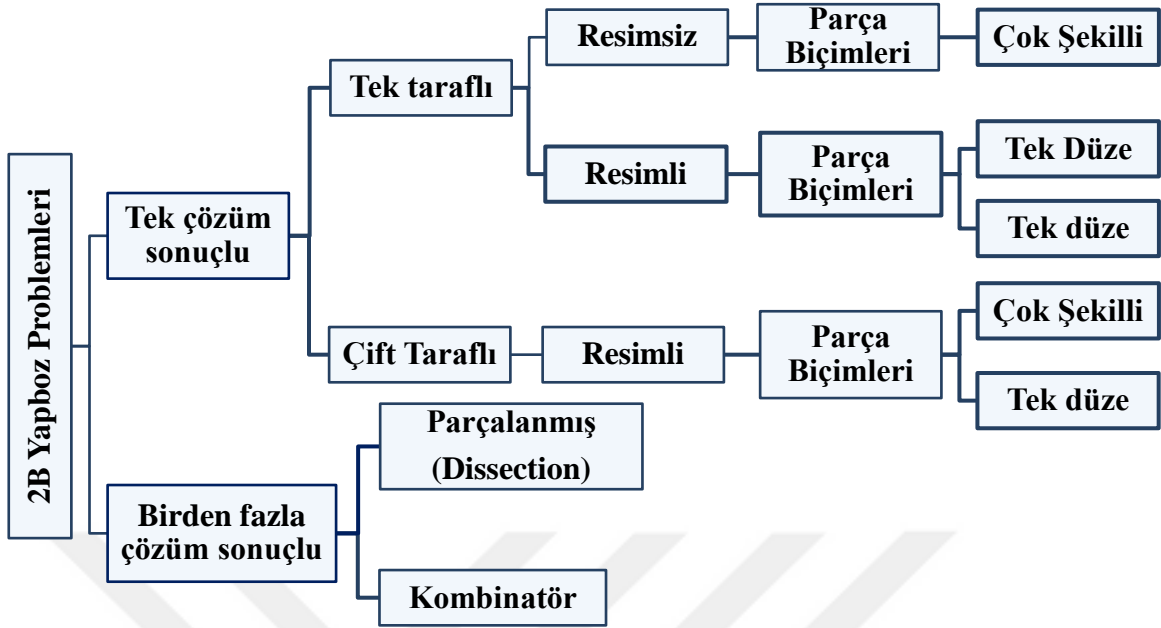
oluşturulmasında parçaların şekil yapıları benzer olduğundan global tutarlılık yaklaşımları parçaların parçaların içerik bilgisinden (yazı, renk vb.) faydalanılarak geliştirilmektedir [19-21].

Yapboz problemlerinde karşılaşılan bir başka belirsizlik problem çözümüne hangi parçadan başlanacağı ile ilgili belirli bir kuralın olmamasıdır. Örneğin literatürde klasik yapbozların çözümünde yapbozların çerçeveye yapısı düşünülerek dış (köşe ve kenar) kısımdaki parçaların bir araya getirilmesine öncelik veren global tutarlılık yaklaşımları [22-24] önerilmiştir. Dış kısımdaki parçalar bir araya getirildikten sonra iç kısımdaki parçaları yerleştirerek söz konusu problemler daha etkili bir şekilde çözülebilmektedir. Farklı bir çözüm stratejisi ise Roy ve Garain [25] tarafında elle parçalanmış fotoğrafların yeniden oluşturulma problemi için önerilmiştir. Araştırmacılar, en büyük boyuta sahip parçanın en iyi görüntü istatistiğini vereceği varsayımında bulunmuşlardır. Bu sebeple en büyük boyuta sahip parçadan başlanıldığı takdirde problemin daha etkili bir şekilde çözülebileceği iddia etmişlerdir.

Literatürde 2B yapboz problem türülerinin ve geliştirilen bilgisayar destekli yöntemlerin kapsamlı bir şekilde sınıflandırılması yapılmamıştır. Bu nedenle çalışmada ilk etapta kapsamlı bir araştırma yapılarak 2B yapboz problem türleri ve geliştirilen bilgisayar destekli yöntemler sınıflandırılmıştır. Böylece tezde önerilen bilgisayar destekli yeniden oluşturma sisteminin hangi tür yapboz problemlerinin çözümünü gerçekleştirdiği ve hangi tür alt problemlerin çözümüne yönelik katkılar sağladığı daha net bir şekilde ortaya konmuştur.

1.3. 2B Yapboz Problemlerinin Genel Sınıflandırılması

Literatürde yapbozların resimli olup olmadığına ve parça çeşitliliği göre sınıflandırmalar yapılmıştır [9, 15]. Fakat bazı yapboz problemlerinin birden fazla çözüm sonuçlarının olabileceği veya parçaların her iki yüzünde içerik olabileceği dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada 2B yapboz problemlerinin genel sınıflandırılması Şekil 1.4'teki gibi yapılmıştır.



Şekil 1.4. 2B yapboz problemlerinin genel sınıflandırılması

Şekil 1.4’te verilen sınıflama üzerinden ele alınan yapboz problemlerinin kapsamı daha net bir şekilde ortaya konabilir. Örneğin parçalanmış banknotların yeniden oluşturulma problemleri bu sınıflandırma üzerinden değerlendirilecek olursa; tek çözüm sonucuna sahip resimli çift taraflı çok şekilli (tek düze olmayan) parça biçimlerine sahip bir yapboz problemi olarak görülecektir. 2B yapboz problemlerinin sınıflandırılmasındaki detaylar aşağıda açıklanmıştır.

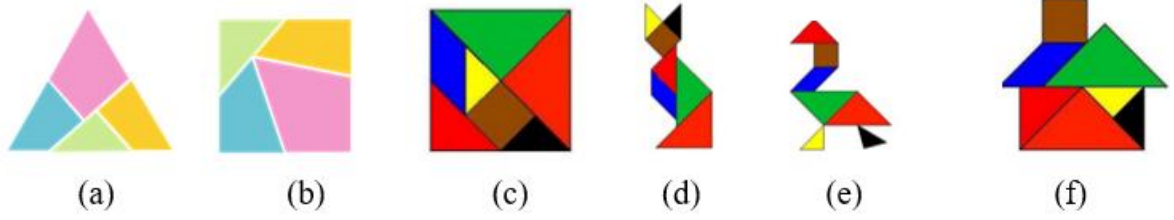
1.3.1. Birden Fazla Çözüm Sonucuna Sahip Yapboz Problem Türleri

Birden fazla çözüm sonucu olan yapbozlar, genellikle oyun/eğlence amaçlı geliştirilen yapbozlardır. Bu yapboz problemleri, parçalanmış (dissection) ve kombinatör olmak üzere iki grup altında toplanabilir.

1.3.1.1. Parçalanmış (Dissection) Yapbozlar

Genellikle çocukların problem çözme becerisini arttırmak için geliştirilmiş yapbozlardır. Bu yapboz problemi, bir materyalin kesilerek parçalara ayrılması ile

oluşturulmuştur [26]. Örnek olarak Şekil 1.5'te parçalanmış yapboz ile ilgili birkaç örnek gösterilmiştir.

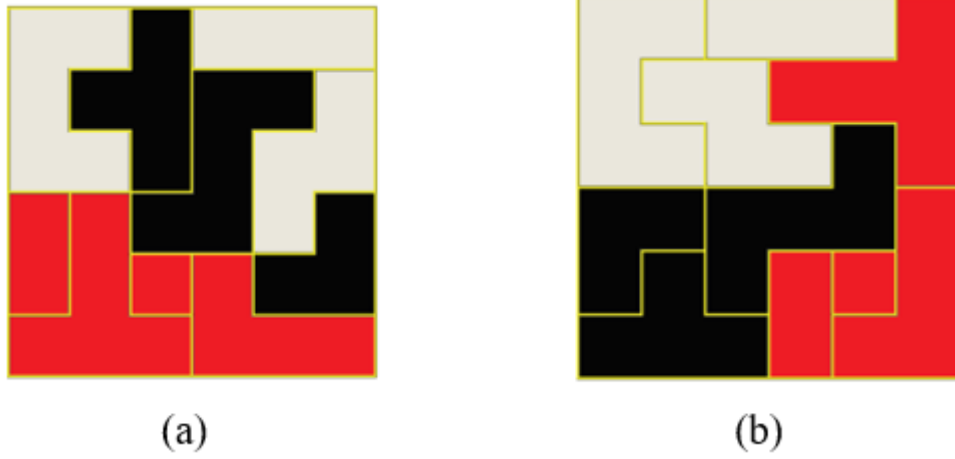


Şekil 1.5. Farklı formların oluşturulması (a) ve (b) dört parçanın bir araya getirilmesi (c) bir materyalin kesilmesi ile tangram parçalarının oluşturulması (d)-(f) tangram parçalarından farklı figürlerin oluşturulması

1902'de Dudeney, bir eşkenar üçgen bölgesini, bir kare bölge oluşturmak üzere yeniden düzenlenebilen 4 parçaya ayırma sorununu (haberdasher's problem) ortaya atmıştır [27, 2019]. Bu problem Şekil 1.5.a'daki gibi parçalara ayrılan bir eşkenar üçgenin yeniden düzenlendiğinde Şekil 1.5.b'deki gibi bir form oluşmaktadır. Dolayısıyla dört yapboz parçası isabetli bir şekilde bir araya getirildiğinde Şekil 1.5.a ve b'deki farklı şekiller oluşabilmektedir. Şekil 1.5.c'de ise bir materyalin kesilerek 7 parçaya ayrılması sonucu tangram oyunun parçaları elde edilmiştir. Şekil 1.5.d, e ve f'de bu parçalar bir araya getirildiğinde farklı figürler elde edilmekte ve figürlerin sayısı daha da arttırabilmektedir [26, 28].

1.3.1.2. Kombinatör Yapbozlar

Aynı (üçgen, kare vb.) veya farklı biçimdeki parçalardan oluşmaktadır. Söz konusu parçalar birçok farklı yol (dizilim) ile bir araya getirildiğinde farklı çözüm sonuçları elde edilebilmektedir [26]. Şekil 1.6'da Kombinatör yapbozlar ile ilgili birkaç örnek gösterilmiştir.



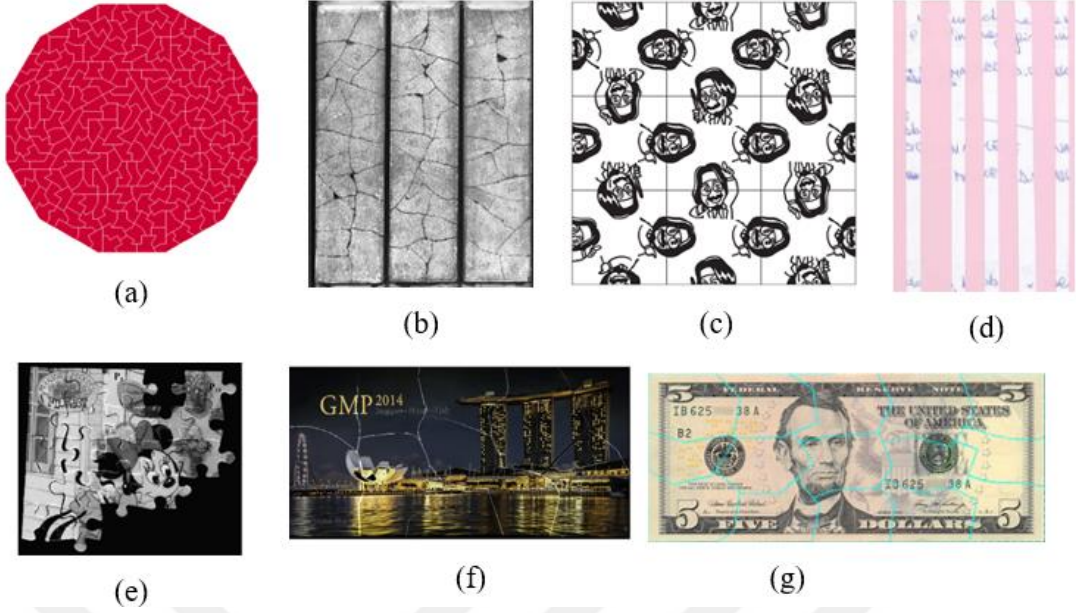
Şekil 1.6. (a)- (b) Polyomino yapboz problemlerinde elde edilen sonuçlar [29].

Şekil 1.6'da görüldüğü gibi kombinator yapbozların tek bir çözümü yoktur. Şekil 1.6.d-f kombinator yapboz kategorisi altında bulunan Polyomino yapboz olarak adlandırılmaktadır [29].

1.3.2. Tek Çözüm Sonucuna Sahip Yapboz Problem Türleri

Tek çözüm sonucu olan 2B yapboz problemleri; oyun/eğlence amaçlı geliştirilen yapbozlar ile parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması ile ilgilidir. Klasik yapboz parçalarının yalnızca bir yüzünde resim, doku vb. içerikler vardır. Benzer şekilde fresk, fotoğraf gibi nesne parçalarının da bir yüzünde içerikler mevcuttur. Dolayısıyla söz konusu problemlerin çözüm sürecinde parçaların ön ve arka yüzlerini belirlemek kolaydır. Fakat parçalanmış bazı nesnelere (çift taraflı basılı belgeler vb.) ait parçaların her iki yüzünde içerikler (yazı vb.) mevcuttur. Bu durumda parçaların ön ve arka yüzlerinin tespit edilmesi, ayrı bir alt problemdir ve problemin çözüm karmaşıklığını arttırmaktadır [30-32]. Bu nedenle tek çözüm sonucuna sahip 2B yapboz problemleri, tek ve çift taraflı olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır.

Bu çalışmada yapboz problemlerinin çözüm stratejisini etkileyen yapbozların resimli veya resimsiz oluşu ve parçaların şekil çeşitliliği dikkate alınmıştır. Şekil 1.7'de tek çözüm sonucuna sahip yapboz problem türleri ile ilgili birkaç örnek gösterilmiştir.



Şekil 1.7. (a) Eternity yapboz [33, 2019] (b) Parçalanmış bir nesne [34] (c) Kenar eşleştirmeli bir yapboz [10] (d) Kâğıt parçalayıcı ile parçalanmış belge [35] (e) Klasik bir yapboz problemi [36] (f) Parçalanmış bir fotoğraf [37] (g) Parçalanmış banknot [38].

Şekil 1.7.a ve b’de verilen yapboz problemlerinde parça yüzeylerinde doku, yazı resim vb. içerikler yoktur. Dolayısıyla söz konusu problemler ancak parçaların kenarları birbirleriyle eşleştirilerek çözülebilmektedir. Bu nedenle bu tarz problemler, resimsiz çok şekilli parça biçimlerine sahip bir yapboz problemi olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 1.7.c ve d verilen yapboz problemlerinde parçaların tek yüzünde içerikler (görsel öğeler, yazı vb.) bulunmaktadır ve parça şekilleri tek düze bir yapıya sahiptir. Söz konusu problemler yalnızca parçaların içerik bilgilerinden faydalanarak çözülebilmektedir. Bu nedenle bu tarz problemler tek taraflı resimli tek düze parça biçimine sahip yapboz problemi olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 1.7.e ve f’de verilen yapboz problemlerinde parçaların tek yüzünde içerikler vardır ve parça biçimleri çok şekilli bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla söz konusu problemlerin çözümünde parçaların hem şekil hem de içerik bilgilerinden faydalanabilmektedir. Bu tarz problemler tek taraflı resimli tek düze parça biçimine sahip yapboz problemi olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 1.7.g parçaların her iki yüzünde içerikler vardır. Bu nedenle bu tarz problemler çift taraflı resimli çok şekilli parça biçimine sahip yapboz problemi olarak sınıflandırılmıştır.

Bu tezde 2B yapbozlar, problem çözümünü etkileyen ana faktörler dikkate alınarak genel olarak sınıflandırılmıştır. Aynı kategoriye giren 2B yapboz problemlerinin çözüm

sürecinde karşılaşılan alt problemler farklılık gösterebilmektedir. Örneğin parçaların bir araya getirilme sürecinde Şekil 1.7.c'de görsel bütünlük sağlanması gerekirken; Şekil 1.7.d'de metinsel bütünlüğün sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca aynı tip parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında farklılıklar görülebilmektedir. Örnek olarak kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış farklı dillerdeki (İngilizce ve Çince) belgelerin yeniden oluşturulmasında metinsel bütünlüğün sağlanmasında farklı alt problemlerle karşılaşılmaktadır [20, 39].

Tek çözüm sonucuna sahip 2B yapboz problemlerinde en ideal sonuca ulaşmak amaçlanır [9]. Örneğin parçalanmış nesnelere ilgili referans fotoğraflara ulaşılabilirdiği zaman, tek olan çözüm sonucu açıkça bilinmektedir [38]. Fakat arkeolojik kazılardan elde edilen parçalanmış sanat eserlerinin yeniden oluşturulmasında, söz konusu eserlerle ilgili herhangi bir ön bilgi elde edilemeyebilir. Bu durumda problem çözümünde en ideal sonuca ulaşıp ulaşılamadığı o alanda uzman kişiler tarafından değerlendirilmelidir.

1.4. Tezin Kapsamı

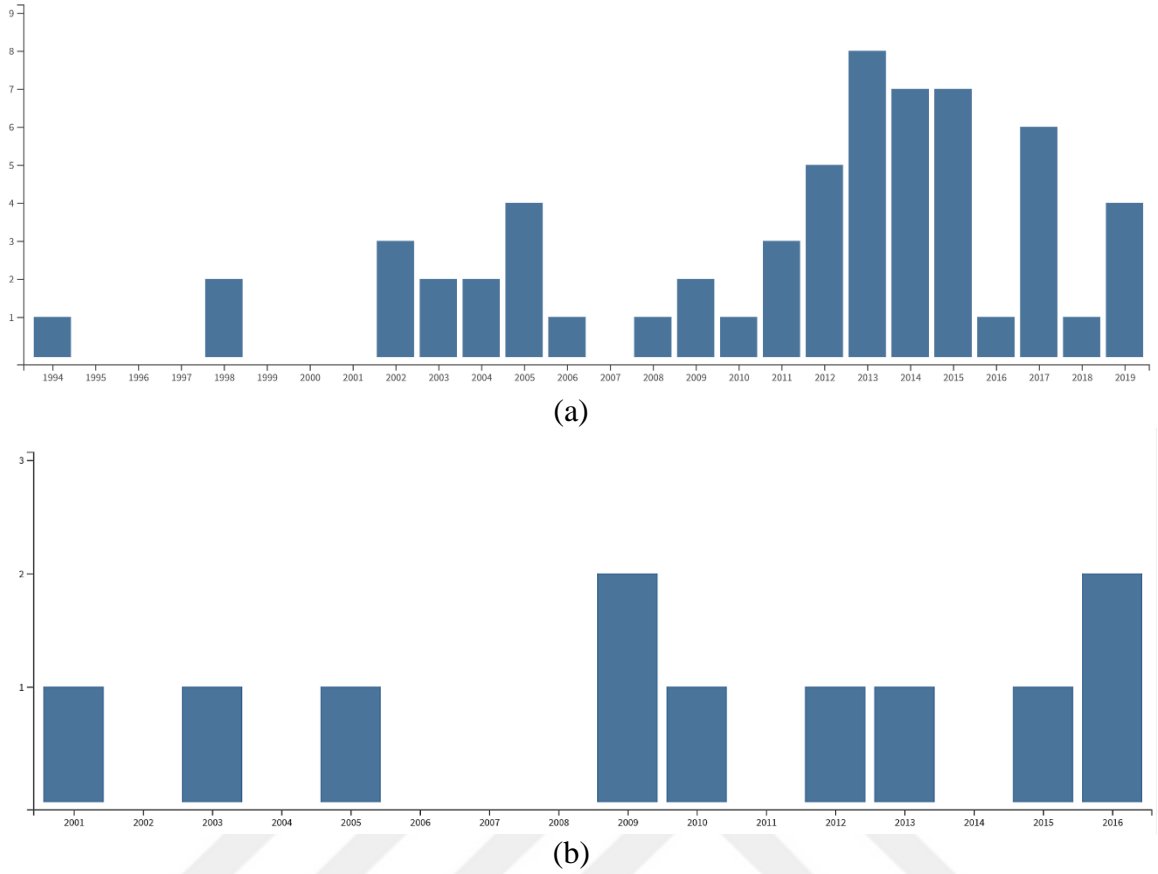
Bu tezde parçalanmış 2B nesnelerin bilgisayar desteğiyle daha hızlı ve daha az hatayla yeniden oluşturulması amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Bu çalışmada 2B yapboz problemleri, sınıflandırılarak sistematik bir hâle getirilmiştir. Önerilen yeniden oluşturma sisteminin kapsamı, söz konusu sınıflandırma üzerinden daha net bir şekilde ortaya konmuştur. Önerilen sistemde tek çözüm sonuçlu tek veya çift taraflı çok şekilli parça biçimlerine sahip 2B yapboz problemleri (parçalanmış nesnelere) ele alınmaktadır.

2B yapboz problemlerinin bilgisayar destekli olarak çözülmesinde, ele alınan nesne tipine göre problem çözümünü zorlaştıran birçok farklı alt problemler mevcuttur. Bununla birlikte parçalanmış nesnenin yeniden oluşturulması, ilgili olduğu alana (adli bilim, restorasyon vb.) özgü birçok farklı alt problem içermektedir. Söz konusu alt problemler, 2B yapboz problemlerinin bilgisayar destekli yöntemler ile çözülmesi başlığı altında detaylandırılacaktır. Dolayısıyla parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasını gerçekleştirecek genel bir yöntemden bahsetmek zordur. Bu nedenle tezde bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulacak nesne türü sınırlandırılmıştır. Ayrıca büyük ölçekli veya tahribatlı parçalar içeren problemlerin çözümünü etkili bir şekilde gerçekleştirmek için yeniden oluşturma süreçlerinde parçalanmış nesnelere ilgili referans görüntülerden faydalanılmıştır. Bu çalışmada çok şekilli olarak parçalanmış fresk, banknot, bilet ve

fotoğrafların bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yeniden oluşturma süreçlerinde karşılaşılan alt problemlerin çözümüne yönelik literatüre çeşitli katkılar yapılmıştır. Geliştirilen bilgisayar destekli yeniden oluşturma sistemi, yapılan çalışmalar bölümünde açıklanacaktır. Bulgular ve irdeleme bölümünde literatürde bu konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalar ile geliştirilen bilgisayar destekli sistemin karşılaştırılması yapılacaktır. Bununla birlikte bu çalışmada elde edilen sonuçlar ilgili oldukları alanlara (adli bilim, bankacılık ve restorasyon) özgü değerlendirmelere tabi tutularak irdelenecektir.

1.5. Yapboz Problemlerinin Bilgisayar Destekli Sistemler ile Çözülmesi

Yapboz problemlerinin bilgisayar desteğiyle çözülmesi güncel bir konudur ve kapsamı oldukça geniştir. Örneğin parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması, yerleştirme problemleri [40], bozulan ses kayıtlarının eski haline getirilmesi [41], amino asit dizisinin proteine takılması [42], DNA/RNA modellenmesi [43], bir görüntünün şifrenmesi ve çözülmesi [44, 45], sabit diskte silinmiş görüntülerin yeniden elde edilmesi [46] ve görüntü sahteciliği [47] gibi problemler literatürde yapboz problemi kapsamında değerlendirilmektedir. Bu nedenle bilgisayar destekli sistemlerinin ele aldığı konular, oyun ve eğlence amaçlı geliştirilen yapbozlar ve parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulma problemleri ile sınırlandırılmaya çalışılmıştır. Fakat literatürde parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında ortak bir terminoloji kullanılmadığından konu ile ilgili yayınlara erişmek için birçok anahtar kelime kullanılması gerekmektedir. Örnek olarak Şekil 1.8'de parçalanmış belgeler ve fresklerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması ile ilgili indeksli dergilerde yapılan yayın sayıları verilmiştir.

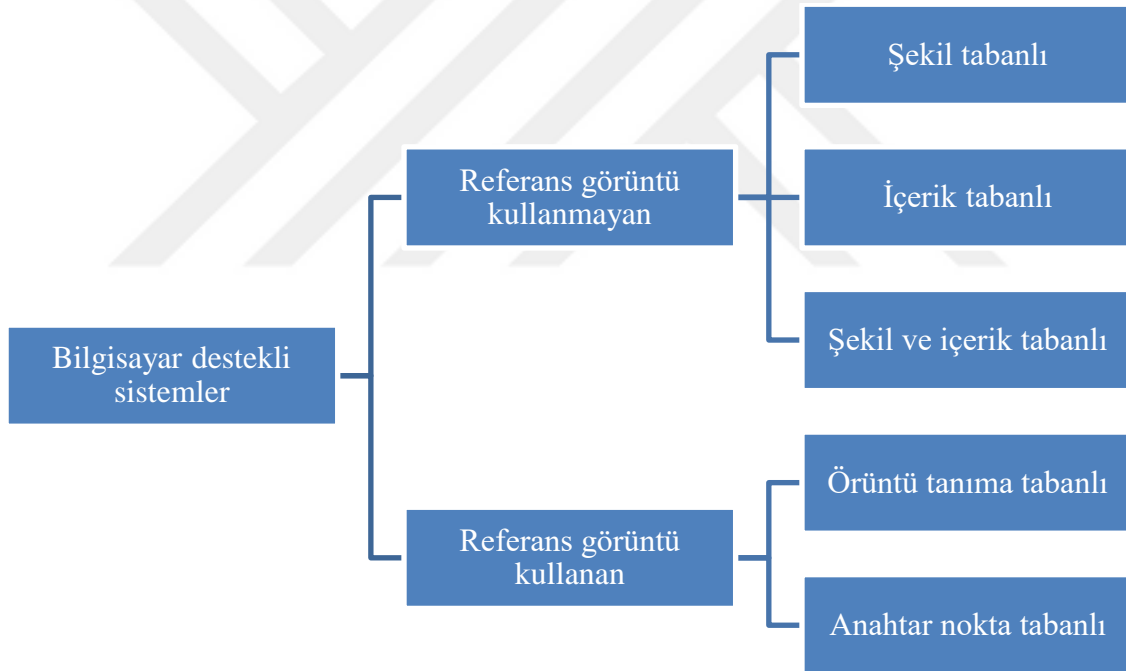


Şekil 1.8. Parçalanmış nesnelere ilgili indeksli dergilerde yapılan yayın sayıları (a) belgeler (b) freskler [59].

Şekil 1.8’de verilen yayın sayıları, Web of Science (WOS) [48, 2019] üzerinden tespit edilmiştir. Şekil 1.8.a’da 1994–2019 yılları arası parçalanmış belgelerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması ile ilgili yapılan sayıları verilmiştir. Toplamda 61 yayın yapıldığı tespit edilmiştir. Söz konusu yayınlara “document reconstruction”, “ripped-up documents”, “torn documents”, “torn paper”, “shredded documents” anahtar kelimeler üzerinden erişilebilmiştir. Yalnızca elle parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulması ile ilgili yayınlara erişilmek istendiğinde bile “torn documents”, “ripped-up documents” veya “torn paper” olmak üzere farklı anahtar kelimelere ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 1.8.b’deki parçalanmış fresklerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması ile ilgili yayınlara “fresco reconstruction”, “fragmented wall painting”, “archeological reconstruction”, “fragmented artefacts” ve “2D object reconstruction” anahtar kelimeleri üzerinden erişilebilmiştir. Söz konusu problemle ilgili 2001-2016 yılları arası 11 yayın yapıldığı tespit edilmiştir.

Literatürde Şekil 1.8’de görüldüğü gibi parçalanmış nesnenelerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulması ile ilgili yapılan akademik çalışmalarda son yıllarda bir artış görülmektedir. Bu konu ile ilgili ortak bir terminoloji kullanılırsa; araştırmacılar söz konusu problemlerle ilgili yayınlara daha kolay bir şekilde erişebilecektir. Literatürde ortak bir terminolojinin geliştirilmesinde bu tezde önerilen sınıflandırmalardan faydalanılabilir.

Literatürde daha önce bilgisayar destekli sistemlerin genel bir sınıflandırılması yapılmamıştır. Bu nedenle çalışmada ilk etapta bilgisayar destekli sistemlerin sınıflandırılması yapılmıştır. Böylece mevcut bilgisayar destekli sistemlerin hangi tür yapboz problemlerin çözümlerini gerçekleştirdiği ve hangi tür alt problemlerin çözümlerine yönelik katkılar sağladığı daha net bir şekilde ortaya konabilecektir. Şekil 1.9’da bilgisayar destekli sistemlerin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1.9. Bilgisayar destekli sistemlerin genel sınıflandırılması

Şekil 1.9’da bilgisayar destekli sistemler, problem çözümünde referans görüntü kullanıp kullanmadığında göre iki gruba ayrılmıştır. Referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerde parçalar birbirleriyle eşleştirilmektedir [9, 16, 17, 37]. Problem çözümünde referans görüntülerden faydalanan bilgisayar destekli sistemlerde ise parçalar referans görüntüler ile eşleştirilmektedir [18, 38]. Dolayısıyla yeniden oluşturma

süreçlerinde bazı farklılıklar (karşılaşılan alt problemler, global tutarlılığın sağlanması vb.) olmaktadır. Bu nedenle bilgisayar destekli sistemlerin iki sınıfa ayrılması daha isabetli olacaktır.

Literatürde referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemler, parçaların birbirleriye eşleştirilme aşamasında kullandıkları yaklaşımlara göre daha önce gruplandırılmaya çalışılmıştır. Parçaların yalnızca kenarlarını eşleştirerek problem çözümünün gerçekleştiren sistemler, şekil veya geometri tabanlı olarak adlandırılmıştır [9, 37]. Parçaları doku, renk vb. özellikleri üzerinden eşleştirerek problem çözümünü sağlayan sistemler doku veya içerik tabanlı olarak adlandırılmıştır [9, 35, 49]. Her iki yaklaşımı bir arada kullanan bilgisayar destekli sistemler ise şekil ve içerik ya da geometri ve renk tabanlı olarak isimlendirilmiştir [31, 37]. Bu çalışmada referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemler 3 gruba ayrılmıştır. Şekil 1.9'da verildiği gibi söz konusu bilgisayar destekli sistemlerin şekil, içerik ve de şekil ve içerik tabanlı olarak daha genel kavramlar ile adlandırılması tercih edilmiştir.

Problem çözümünde referans görüntülerden faydalanan bilgisayar destekli sistemlerin gruplandırılması literatürde daha önce yapılmamıştır. Mevcut bilgisayar destekli sistemler, parçalar ile referans görüntülerin eşleştirilmesinde kullandıkları yöntemlere göre Şekil 1.9'da verildiği gibi iki gruba ayrılmıştır. Dolayısıyla ilerleyen zamanlarda farklı tür eşleştirme yöntemleri (örüntü tanıma ve anahtar nokta tabanlı haricinde) kullanan bilgisayar destekli sistemler geliştirildiğinde grup sayısı daha da artacaktır.

Tablo 1.1'de bilgisayar destekli sistemler ile çözülmeye çalışılan bazı yapboz problem türleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Bilgisayar destekli sistemler ile çözülmeye çalışılan bazı yapboz problem türleri

Bilgisayar Destekli Sistemler	Yaklaşım türü	Yapboz Problem Türü	Örnekler
Referans görüntü kullanmayan	Şekil Tabanlı	Tek taraflı resimsiz	<ul style="list-style-type: none"> • Klasik yapbozlar • Parçalanmış seramikler
		Tek taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Parçalanmış belgeler • Parçalanmış freskler • Arkeolojik kazılardan çıkarılan parçalanmış sanat eserleri

Tablo 1.1'in devamı

Bilgisayar Destekli Sistemler	Yaklaşım türü	Yapboz Problem Türü	Örnekler
Referans görüntü kullanmayan	İçerik Tabanlı	Tek taraflı resimli tek düze parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış dokümanlar • Kenar eşleştirmeli yapbozlar • Kare parçalara ayrılmış ve karıştırılmış resimli yapbozlar
		Tek taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Arkeolojik kazılardan çıkarılan parçalanmış sanat eserleri
	Şekil ve İçerik Tabanlı	Tek taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Klasik yapbozlar • Elle yırtılmış dokümanlar • Elle yırtılmış fotoğraflar
Referans görüntü Kullanan	Örüntü tanıma tabanlı	Tek taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Parçalanmış freskler
	Anahtar nokta tabanlı	Çift taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip	<ul style="list-style-type: none"> • Parçalanmış banknotlar

Tablo 1.1'de verilen yapboz problemleri (örnekler) bu çalışmada önerilen sınıflama üzerinden gruplandırılmıştır. Literatürde aynı kategoriye giren yapboz problemlerinin çözümünün gerçekleştirilmesi için farklı tip bilgisayar destekli sistemler önerilebilmektedir. Tablo 1.1'de görüldüğü gibi tek taraflı resimli çok şekilli parça biçimlerine sahip yapboz problemlerinin çözümünü gerçekleştirmek için şekil ve örüntü tanıma tabanlı bilgisayar destekli sistemler önerilmiştir [18,50]. Örneğin Papaodysseus ve ark. [50] parçalanmış freskleri geliştirdikleri şekil tabanlı bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturma çalışmıştır. Fornasier ve Toniolo [18] ise parçalanmış freskleri örüntü tanıma tabanlı bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturmaya çalışmıştır. Araştırmacılar ele aldıkları problemde tahribatların fazla (eksik parçaların olma durumu) ve parçaların çok küçük boyutlarda (5-6 cm²) olması sebebiyle şekil tabanlı yaklaşımların yetersiz kalacağını belirtmiştir. Parçalanmış freskler ile ilgili referans görüntülerden faydalanarak problem çözümünü gerçekleştirmeye çalışmıştır.

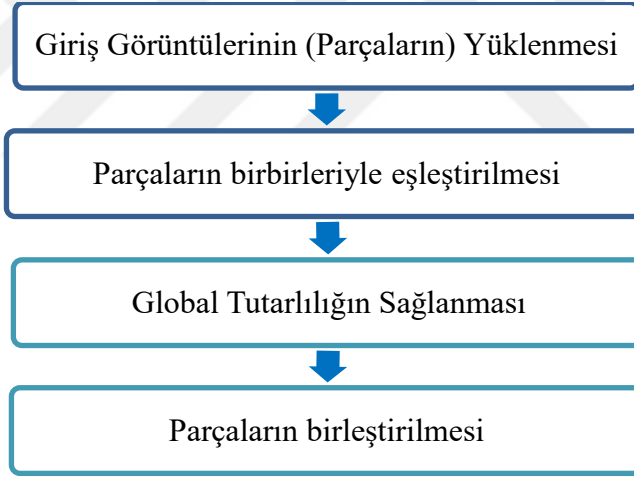
Parçalanmış nesnelere yeniden oluşturulması oldukça zorlayıcı alt problemler içermektedir. Bu nedenle problem çözümünün gerçekleştirilebilmesi için Tablo 1.1'de verilen yaklaşımlardan birden fazlası kullanılabilir. Örneğin Li ve ark. [51]

parçalanmış aynı tip (aynı nominal değere sahip) birden fazla banknotun yeniden oluşturulması için bilgisayar destekli sistem önermiştir. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemde yeniden oluşturulma süreçlerinde parçalanmış banknotlar ile ilgili referans görüntüleri kullanılmıştır. Parçaların referans görüntüdeki ait oldukları yerler anahtar nokta tabanlı yaklaşım kullanarak belirlenmiştir. Fakat çoklu yeniden oluşturma süreçlerinde global tutarlılığın sağlanması için şekil tabanlı yaklaşıma ihtiyaç duyulmuştur.

Literatürde geliştirilen bilgisayar destekli sistemler aşağıda özetlenmiştir.

1.5.1. Problem Çözümünde Referans Görüntü Kullanmayan Bilgisayar Destekli Sistemler

Bu tez kapsamında referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı Şekil 1.10'daki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 1.10. Referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı

Şekil 1.10. 'da verilen ana aşamalar aşağıda özetlenmiştir.

1. Giriş Görüntülerin (Parçaların) Yüklenmesi: Parçalar tarayıcılar vb. cihaz ile dijital hale getirilir [31].
2. Eşleştirme işlemi: Parçalardan özellikler çıkarılır. Çıkarılan özellikler birbirleriyle eşleştirilir [17, 31].

3. Global Tutarlılığın Sağlanması: Eşleştirme işleminde hatalı olan eşleşmeler elimine edilir. Parçalar bir araya getirilmeden (birleştirilmeden) önce yapbozun bütünlüğünü sağlanıp sağlanılmayacağı ile ilgili doğruluk oranları ortaya konulur [17, 31].
4. Çıkış Görüntüsünün Elde Edilmesi: Global tutarlılığı sağlayan parçalar birleştirilir [16, 17, 31].

Referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemler, 3 başlık altında aşağıda özetlenmiştir.

1.5.1.1. Şekil Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler

Literatürde yapılan ilk çalışmalarda klasik yapbozların bilgisayar destekli olarak çözümü gerçekleştirilmiştir [11, 15, 16, 22]. Yapboz parçaları birbirleriyle eşleştirilirken parça kenarlarında girinti ve çıkıntılar [11, 22] veya parçaların şekil yapılarında kritik noktalar [16] ya da eğri eşleştirme yöntemleri [52] ile kullanılmıştır. Global tutarlılık sağlanmasında parça sınırlarının birbirine kenetlenme durumları dikkate alınmıştır [16, 22, 52]. Global tutarlılığı sağlayan parçalar birleştirilerek problem çözümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca problem çözümünün hızlandırılması için yapbozların çerçeveye yapısı düşünülerek dış (köşe ve kenar) kısımdaki parçaların bir araya getirilmesine öncelik veren global tutarlılık yaklaşımları [22-24] önerilmiştir. Dış kısımdaki parçalar bir araya getirildikten sonra iç kısımdaki parçaları yerleştirerek yapboz problemleri daha etkili bir şekilde çözülebilmektedir.

Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında parçaların şekilleri kompleksli bir yapıya sahiptir ve parça şekil çeşitliliği belli değildir. Bu nedenle parçaların şekil kompleksliliği azaltılarak eşleştirme işlemi kolaylaştırılmaya çalışılmıştır. Eşleştirme işleminin maliyetinin azaltılması için Douglas Peucker [53-55], çoklu ölçekleme [34, 56], eğri eşleştirme [17], parçaların kontur bilgilerini kısmi eşleştirme [30, 57] yöntemleri kullanılmıştır. Global tutarlılığın sağlanması çeşitli kriter üzerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kriterlerden bazıları: parçaların eşleşen kenarların uzunluklarının benzer ve açısal değerlerinin birbirlerini uyumlu (360 dereceye tamamlaması) olmasına [53, 54], parçaların birleşim yerlerinin örüntü oluşturup oluşturmadığı [56], parça kenarlarının birbirine maksimum geçme mesafesinin belirli bir eşik değerinden fazla olmaması [58]

şeklindedir. Eşleştirme işleminde oluşan kombinasyonları değerlendirmek için graf yapısı [54,55], genetik algoritma tabanlı [59] yaklaşımlardan faydalanılmıştır.

Literatürde aynı tür problemi (parçalanmış belgeler vb.) ele alan şekil tabanlı bilgisayar destekli sistemlerde genellikle standart bir veri seti kullanılmamıştır. Ayrıca bilgisayar destekli yeniden oluşturma süreleri rapor edilmemiştir. Dolayısıyla aynı tür problemi ele alan şekil tabanlı destekli sistemlerin problemleri çözümü süreleri kıyaslanamamıştır. Bilgisayar destekli sistemle yapılan yeniden oluşturma sonuçları ile elle yapılan yeniden oluşturma sonuçların ne oranda örtüştüğü ile ilgili bir başarı yüzdesi verilmemiştir. Ayrıca önerilen şekil tabanlı bilgisayar destekli sistemlerde eksik parçaları olan 2B yapboz problemlerinde global tutarlılık yaklaşımının nasıl olacağı ile ilgili herhangi bir değerlendirmeye rastlanmamıştır.

Literatürde geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde genellikle tek bir nesnenin yeniden oluşturulması ele alınmıştır. Fakat günlük hayatta yeniden oluşturma işlemlerinde birden fazla nesneye ait parçalar aynı ortamda (karışmış bir şekilde) bulunabilmektedir. Bu durumda yeniden oluşturma işleminin çözüm karmaşıklığı daha da artacaktır. Lalitha ve ark. [55] tarafından 2017 yılında birden fazla belgenin yeniden oluşturulması problemi ele alınmıştır. Fakat araştırmacılar, 8 parçaya ayrılmış iki adet belgenin yeniden oluşturma sonuçlarını vermişlerdir. Parçalanmış belgelerin sayısının fazla olduğu veya ele alından problemde parça sayısının fazla olduğu durumlarda önerilen bilgisayar destekli yöntemin performansı rapor edilmemiştir.

1.5.1.2. İçerik Bilgisayar Destekli Sistemler

İçerik tabanlı bilgisayar destekli sistemler genellikle benzer şekil yapılarını içerisinde barındıran yapboz problemlerinin çözülmesi için önerilmiştir. İçerik tabanlı yöntemlerden bir kısmı kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulması için geliştirilmiştir. Kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulmasında parçalardaki renk, yazı karakteristiği, satır hizalanması vb. özelliklerden faydalanılmıştır. [20, 21, 32, 39, 60, 61]. Benzer bilgisayar destekli sistemler ise kenar eşleştirmeli yapboz problemleri [62], karelere ayrılarak parçalanmış ve karıştırılmış görüntülerin yeniden oluşturulması [63, 64, 65] için geliştirilmiştir. Kovalsky ve ark. [62] tarafından ele alınan kenar eşleştirmeli yapboz probleminde parçalar renkli kenarlara sahiptir ve renkler komşu parçaların kenarları boyunca eşleşmektedir. Araştırmacılar söz konusu problemini polinom

denklemleri sistemleri üzerinden çözmeye çalışmıştır. Karelere ayrılarak parçalanmış ve karıştırılmış görüntülerin yeniden oluşturulmasında Andalo ve ark. [63] parçaların renk bilgilerinden faydalanmıştır. Araştırmacılar, geliştirdikleri kuadratik programlama tabanlı yöntem ile problemi çözmeye çalışmıştır. Önerilen yöntemde, enerji fonksiyonuna göre, parçalara konum ataması yapılmaktadır. Global tutarlılığın sağlanmasında, komşu karolardaki (kare görüntülerdeki) yatay ve dikey içerik farklılıkları dikkate alınmıştır. Sholomon ve ark. [64] ise genetik algoritma (GA) tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Parçalar renk özellikleri üzerinden birbirleriyle eşleştirilmiştir. Global tutarlılığın sağlanmasında parçaların eşleşen kenarları boyunca benzer renkleri paylaşıp paylaşmadığına bakılmıştır. Jin ve ark. [65] ise parçaların görüntü özelliklerinin çıkarılması yeni bir yöntem önermiştir. Ayrıca parçaların kenarlarındaki renklerin uyumluluğunu tespit etmek için MGC (Mahalanobis Gradyan Uyumluluğu) tabanlı yöntem kullanmıştır. Global tutarlılığın sağlanmasında parçaların görüntü özellikleri ve kenarlarındaki renk özellikleri dikkate alınmıştır.

Tek düze şekil yapılarına sahip olmayan yapboz problemlerinin çözümü için içerik tabanlı bilgisayar destekli sistemler geliştirilmiştir. Nielsen ve ark [66] resimli yapbozların çözümünde parçaların doku ve kenarlarındaki renk özelliklerini çıkarmıştır. Problem çözümünde böl ve fethet (Divide and Conquer) stratejisini kullanılmıştır. Parçalar renk ve doku özelliklerine göre gruplandırılmıştır. Çıkarılan özelliklere göre parçalar birbirleriyle eşleştirilerek problem çözümü gerçekleştirilmiştir. Sağiroglu ve ark. [49] parçalanmış arkeolojik eserleri yeniden oluşturmaya çalışmıştır. Söz konusu problemde şekil tabanlı yaklaşımların yetersiz kalacağı belirtilmiştir. Bu nedenle parçaların sınır bölgelerinden içboyama ve doku sentezi yöntemleri ile özellikler çıkarılarak parçalar birbirleriyle eşleştirilmiştir. Parçaların hizalanma problemi FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) tabanlı yöntem ile üstesinden gelinmiştir. Global tutarlılık, FFT öteleme (shift) teorisi kullanılarak parçalar arasındaki korelasyonun en üst düzeye çıkarılması ile sağlanmıştır.

Literatürde farklı türdeki nesnelere yeniden oluşturacak daha genel bir içerik tabanlı yöntem sistem sunulmaya çalışılmıştır. Andalo ve ark. [67] daha önceki çalışmalarında önerdikleri kuadratik programlama tabanlı yöntemi [63] güçlendirmişlerdir. Araştırmacıları, seramik karolardan oluşan sanat eserlerinin inşasını ve kâğıt parçalayıcılar ile parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulmasını gerçekleştirmeye çalışmıştır. Fakat farklı tip nesnelere yeniden oluşturulmasında farklı alt problemlerle karşılaşabilmektedir. Örneğin parçalanmış fresklerin yeniden oluşturulmasında parçaların tek tarafında içerik

vardır. Fakat parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulmasında parçaların çift tarafında içerik (yazı, şekil, tablo vb.) olabilir. Bu sebeple yeniden oluşturma işlemi daha da zorlaşacaktır [30-32]. Ayrıca belgeler kâğıt parçalayıcı ile farklı biçimlerde (şerit, çapraz kesim) parçalanabilir [19, 20, 39]. Bununla birlikte farklı dillerde basılan (İngilizce ve Çince) belgelerin içerik tabanlı yöntemler üzerinden farklı yaklaşımlar benimsenerek yeniden oluşturulması gerekmektedir [20, 39]. Dolayısıyla parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında genel bir yöntemden bahsetmek oldukça zordur.

Literatürde aynı tür problemi (parçalanmış belge vb.) ele alan içerik tabanlı bilgisayar destekli sistemlerde genellikle standart bir veri seti kullanılmamıştır. Karesel olarak parçalara ayrılmış görüntüler ile ilgili yapılan çalışmalarda [67, 68] benzer görüntüler (veri setleri) kullanılmıştır. Fakat araştırmacılar yeniden oluşturma sürelerini rapor etmemişlerdir. Dolayısıyla literatürde aynı tür problemi ele alan içerik tabanlı destekli sistemlerin problemleri çözümü süreleri kıyaslanamamıştır. Bilgisayar destekli sistemler ile yapılan yeniden oluşturma sonuçları ile elle yapılan yeniden oluşturma sonuçlarının ne oranda örtüştüğü ile ilgili başarı yüzdeleri verilmemiştir. Ayrıca eksik parçaları olan büyük ölçekli problemlerde çoklu (birden fazla nesnenin) yeniden oluşturma işlemini gerçekleştiren bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.5.1.3. Şekil ve İçerik Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler

Şekil ve içerik tabanlı bilgisayar destekli sistemler ilk olarak resimli klasik yapbozların çözümü için geliştirilmiştir. Kosiba ve Shao [69] yapboz parçalarının şekil ve kenarlarındaki renklerin karakteristik özelliklerini çıkarmıştır ve parçaları bu özellikler üzerinden eşleştirmiştir. Global tutarlılığın sağlanmasında parçaların birleşim yerindeki kenetlenme durumları dikkate alınmıştır. Chung ve ark. [70] ise problem çözümünde parçaların sınırlarındaki kritik noktalar ve kromatik bilgilerden faydalanmıştır. Global tutarlılığın sağlanmasında farklı yaklaşımlar test edilmiştir. Bunlar: atama problemi temelli yaklaşım (AP), gezgin satıcı problemi (TSP) ve atama problemi temelli yaklaşım, gezgin satıcı problemi ve Kbest tabanlı yaklaşımlardır. En hızlı çözüm TSP ve Kbest tabanlı yaklaşımdan elde edilmiştir. Yao ve Shao [36] yapbozları parçalarını gruplandırarak problem çözümünü hızlandırmaya çalışmıştır. Parçaların kenarları eşleştirilmiş ve parçaların sınır bölgelerindeki görüntü uyumluluk dereceleri belirlenmiştir. Global tutarlılığın sağlanmasında kenarları eşleşen parçaların sınır bölgelerinde görüntü

uyumluluklarına bakılmıştır. Literatürde bir yapboza ait parçalar bir araya getirilmiştir. Birden fazla yapboza ait parçaların bir arada bulunması durumunda çoklu yeniden oluşturma işlemlerini gerçekleştiren çalışmaya rastlanmamıştır.

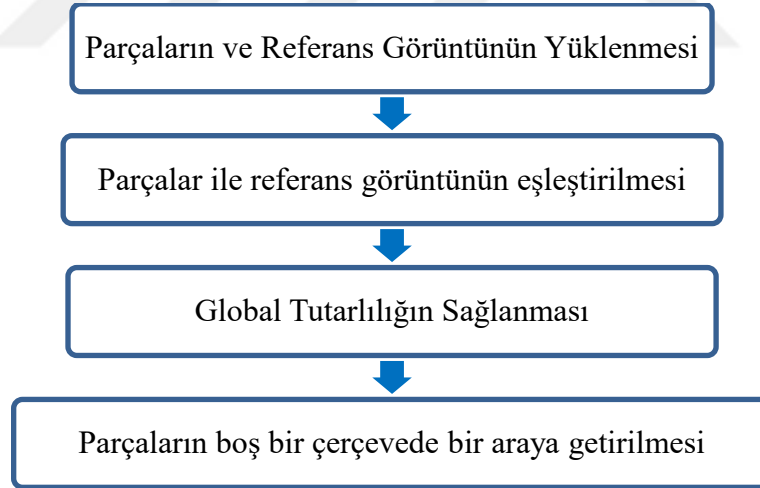
Literatürde şekil ve içerik tabanlı sistemler ile parçalanmış fotoğraflar/görüntüler [25, 37, 71, 72] magazin sayfaları [31, 73], seramikler [72, 74] ve freskler [75] yeniden oluşturulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [31, 37, 71, 73] parçaların kenarları ve sınırlarındaki kritik noktaların renkleri birbirleriyle eşleştirilmiştir. Parçaların sınır özelliğinin çıkarılmasında Douglas Peucker (DP) yönteminden faydalanılmıştır [31, 37, 73]. Eşleştirme işlemi oluşan kombinasyonların değerlendirilmesi için graf tabanlı yaklaşımlar kullanılmıştır [31, 37, 71, 73]. Shu-Yu ve ark. [74] ise seramik parçalarını, kenar ve renk bilgilerine göre eşleştirmiştir. Eşleştirilmesinde oluşan kombinasyonları değerlendirmek için Parçacık Sürü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization) yaklaşımından faydalanmıştır. Zhang ve ark. [72] ise parçalanmış fotoğrafların ve seramiklerin yeniden oluşturulmasını gerçekleştirmiştir. Problem çözümünde açgöz stratejisi benimsenmiştir. Global tutarlılığın sağlanmasında the EMD (earth mover's distance) yönteminden faydalanılmıştır. Roy ve Garain [25] parçalanmış fotoğrafların yeniden oluşturulmasında görüntü istatistiği temel alan bir bilgisayar destekli sistem geliştirmiştir. En büyük boyuta sahip parçanın en yüksek görüntü istatistiği vereceği iddia edilmiş ve problem çözümüne bu parçadan başlanılmıştır. Parçaların sınırlarında benzer doku özelliklerine sahip diğer parçalar aratılmıştır. Benzer dokuların tespit edilmesinde Gauss dağılım uyumluluğuna bakılmıştır. Parçalar kenar ve doku benzerliğine göre eşleştirilerek bir araya getirilmiştir. Farklı bir sistem ise Skembris ve ark. [75] tarafından parçalanmış fresklerin yeniden oluşturulması için geliştirilmiştir. Araştırmacılar daha önce geliştirdikleri şekil tabanlı sistemi [50] eşleştirme işlemi parçaların renk ve tematik içeriklerini kullanarak güçlendirmiştir. Araştırmacılar, parçaların renk bilgilerinin yanında tematik içeriklerinden faydalanılması problem çözümünde global tutarlılığın sağlanmasında olumlu etki yaptığını belirtmiştir.

Şekil ve içerik tabanlı bilgisayar destekli sistemlerde genellikle bir nesneye ait parçalar bir araya getirilmiştir. Birden fazla nesneye ait parçaların bir arada bulunması durumunda çoklu yeniden oluşturma işlemlerini gerçekleştiren sınırlı sayıda yayın yapılmıştır. Liu ve ark. [71] tarafından önerilen graf tabanlı yaklaşımda parçalanmış görüntülerin çoklu olarak yeniden oluşturulması için graflar alt graflara ayrılmıştır. Her bir alt graf için geçerli bir yayılma ağacı (spanning trees) tespit edilerek problem çözülmeye

çalışılmıştır. Çalışmada problem çözüm sürecinde izomorf yapıları grafların belirlenmesi durumu ile ilgili herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır. Bununla birlikte parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması tek taraflı yapboz problemi şeklinde ele alınmıştır. Literatürde aynı tür problemi (parçalanmış fotoğraflar vb.) ele alan şekil ve içerik tabanlı bilgisayar destekli sistemler standart bir veritabanı üzerinden geliştirilmemiştir. Bununla birlikte genellikle bilgisayar destekli sistemlerin yeniden oluşturma performansları rapor edilmemiştir.

1.5.2. Problem Çözümünde Referans Görüntü Kullanan Bilgisayar Destekli Sistemler

Referans görüntü kullanan bilgisayar destekli sistemler, büyük ölçekli ve/veya tahribat derecesi fazla olan parçaları içerisinde barındıran 2B yapboz problemlerinin çözümünü gerçekleştirmek için önerilmiştir. Bu tez kapsamında söz konusu bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı Şekil 1.11'deki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 1.11. Referans görüntü kullanan bilgisayar destekli sistemlerin genel yapısı

Şekil 1.11.'de verilen ana aşamalar aşağıda açıklanmıştır.

1. Giriş Görüntülerinin (Parçaların) Yüklenmesi: Parçalar tarayıcılar vb. cihaz ile dijital hale getirilir. Parçalanmış nesneye ait referans görüntü elde edilir [18, 38].

2. Parçalar ile referans görüntünün eşleştirilmesi: Parçalar referans görüntü ile eşleştirilir [18, 38].
3. Global Tutarlılığın Sağlanması: Eşleştirme işleminde hatalı olan sonuçlar elimine edilir. Parçanın referans görüntüdeki konumu belirlenir [18, 38].
4. Çıkış Görüntüsünün Elde Edilmesi: Parçaların hizalanması gerçekleştirilir. Hizalanan parçalar nesnede ait oldukları konuma göre boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilir [18, 38].

Referans görüntü kullanan bilgisayar destekli sistemler, aşağıda açıklanmıştır.

1.5.2.1. Örüntü Tanıma Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistem

Örüntü tanıma tabanlı bilgisayar destekli sistem, Fornasier ve Toniolo tarafından 2005 yılında geliştirilmiştir. Bu sistem, parçaların anahat şeklini esas alan yaklaşımların yetersiz kaldığı büyük ölçekli problemlerin çözümünü gerçekleştirmek için önerilmiştir. Önerilen bu sistemde parçalanmış freskler yeniden oluşturulmaya çalışılmıştır. Yeniden oluşturulma süreçlerinde fresklerin parçalanmadan önceki yıllarda (1900-1920) çekilmiş fotoğrafları elde edilmiştir. Parçalar referans görüntüler ile örüntü tanıma yöntemi kullanarak eşleştirilmiştir. Örüntü tanıma yöntemi, örnekleme teorisine dayanan ayrık dairesel harmonik açılımlardan (discrete Circular Harmonic expansions) faydalanarak geliştirilmiştir. Daha sonra parçaların freskte ait olabilecekleri konumlar belirlenmiştir [18]. Şekil 1.12’de parçaların referans görüntüdeki konumlarının belirlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Fresk parçalarının referans görüntüdeki konumlarının belirlenmesi [18].

Şekil 1.12’de verildiği gibi parçalar referans görüntü ile eşleştirilerek bir araya getirilmektedir. Önerilen bilgisayar destekli sistemin avantajı yeniden oluşturma işleminde karşılaşılan bazı alt problemlere karşı dayanıklı olmasıdır. Bu alt problemler: parçalar ile referans görüntüler arasında görüntü farklılığının olması, parçaların rotasyona uğramış olması, referans ve parça görüntülerinde gürültülerin olması, çok küçük boyutlu parçaların söz konusu eserlerde yerlerinin tespit edilme zorluğu şeklindedir. Araştırmacılar, parçaların eserlerdeki (referans görüntülerdeki) konumlarının hesaplanmasındaki işlem maliyetini ilerleyen zamanlarda iyileştirileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte önerilen bilgisayar destekli sistemin problemi ne kadar bir sürede çözülebildiği rapor edilmemiştir. Bir diğer eksiklik ise ele alınan problemle ilgili verisetleri İnternet ortamında paylaşılmamıştır.

1.5.2.2. Anahtar Nokta Tabanlı Bilgisayar Destekli Sistemler

Anahtar nokta tabanlı bilgisayar destekli sistemler, büyük ölçekli veya tahribatlı parçalar içeren yapboz problemlerinin daha etkili bir şekilde çözümünü gerçekleştirmek için önerilmiştir. Önerilen bilgisayar destekli sistemlerde parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması ele alınmıştır [38, 51, 76, 77].

Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar destekli sistemler ile anahtar nokta tabanlı sistemler aynı kategoridedir. Dolayısıyla yeniden oluşturma süreçlerinde karşılaşılan alt problemlerin detaylandırılması için literatürdeki anahtar nokta tabanlı sistemler alt aşamaları ile birlikte aşağıda açıklanmıştır.

(a) Parçaların ve Referans Görüntünün Yüklenmesi

Parçalanmış banknotlar ile ilgili referans banknotlar elde edilmiştir. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde banknot parçaları çok şekilli bir yapıya sahiptir. Banknot parçaları tarayıcı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Dijital hale getirilen parçalar ile referans banknotlar arasında ölçekleme problemi yoktur [38, 51, 76, 77]. Li ve ark. [51] tarafından geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde ayrıca sentetik banknot parçaları kullanılmıştır. Sentetik banknot parçaları, banknot görüntüleri bilgisayar ortamında düzensiz şekil yapıları oluşturacak şekilde kesilerek oluşturmuştur [51].

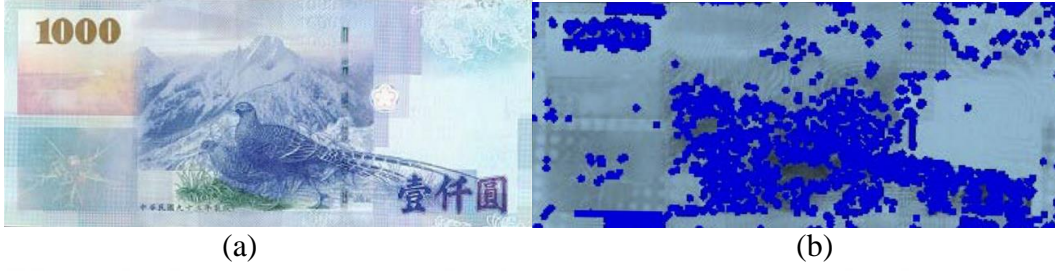
Literatürde parçalanmış banknotların yeniden oluşturulmasında ortak bir veriseti kullanılmamıştır. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 76, 77] kullanılan verisetlerinde belirlenen eksiklikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Verisetlerinin hiçbiri İnternet ortamında paylaşılmamıştır.
2. Problem çözümünde parçalar ile referans banknot arasında olan görüntü farklılığı problemi detaylandırılmamıştır.
3. Verisetleri hazırlanırken yalnızca tek bir tarayıcı kullanılmıştır. Dolayısıyla söz konusu veri setlerinde farklı tarayıcılar kullanılması durumunda parçalarda oluşabilecek renk problemleri ele alınmamıştır.
4. Verisetleri yalnızca bir ülkeye ait parçalanmış banknotları içermektedir. Dolayısıyla farklı ülkelere ait parçalanmış banknotlar kullanılarak problem çözümünde ele alınan banknot çeşitliliğinin artırılması gerekir.
5. Verisetler, çift taraflı yapboz problemini yansıtmamaktadır. Veriseti hazırlanırken banknotun ön ve arka yüzleri önceden tespit edilmiştir. Yeniden oluşturma işlemi hangi yüze göre yapılacaksa parçaların yalnızca ilgili olan yüzleri taratılmıştır. Fakat problem gerçek boyuta taşında parçaların hangi yüzünün ön hangi yüzünün arka olduğu ile ilgili herhangi bir ön bilgi mevcut değildir.

(b) Eşleştirme İşlemi

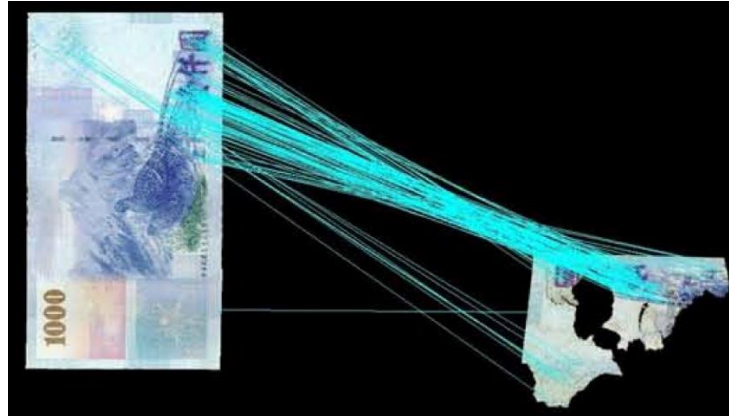
Parçalar ile referans görüntünün eşleştirilmesinde anahtar nokta tabanlı yöntemlerden biri olan Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform-SIFT)

yöntemi [78] kullanılmıştır. SIFT, yöntemi ölçekleme, rotasyon ve ötelemeden bağımsız olarak imgelerden öznelikler çıkarmaktadır [78]. Örnek olarak Şekil 1.13'te Wu ve ark. [76] tarafından geliştirilen bilgisayar destekli sistemde SIFT yöntemi ile referans banknottan anahtar noktaların çıkarılması gösterilmiştir.



Şekil 1.13. 1000 Yeni Taylan (NT) dolarına ait (a) referans görüntü (b) SIFT yöntemi ile referans görüntüde tespit edilen anahtar noktalar

Şekil 1.16'daki parçalardan anahtar noktalar çıkarılmaktadır. Daha sonra parçadaki anahtar noktalar ile referans banknottaki anahtar noktalar birbirleriyle eşleştirilmektedir. Örnek olarak Şekil 1.14'te Wu ve ark. [76] tarafından geliştirilen bilgisayar destekli sistemde bir banknot parçasının SIFT yöntemi kullanılarak referans görüntü ile eşleştirilmesi gösterilmiştir.



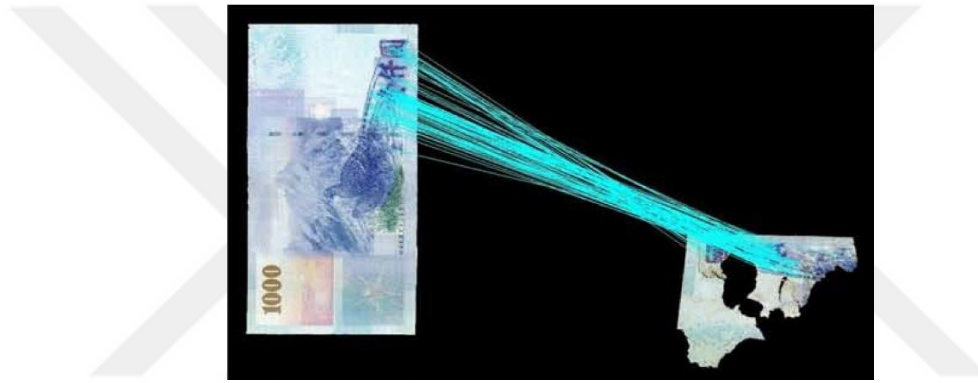
Şekil 1.14. SIFT yöntemi tabanlı parça ile referans görüntünün eşleştirilmesi [76].

Şekil 1.14'te gösterildiği gibi SIFT [78] yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen eşleştirme işleminde parçanın referans banknottaki konumları, ilk etapta isabetli bir

şekilde tespit edilememektedir. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 76, 77] hatalı eşleşen anahtar noktaların elenerek problem çözümünde global tutarlılık sağlanmaya çalışılmaktadır.

(c) Global tutarlılığın sağlanması

Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde global tutarlılığın sağlanması için Rastgele Örnek Konsensüsü (Random Sample Consensus-RANSAC) [79] yöntemi ve RANSAC yönteminin türevi olan MSAC yöntemi [80] ve de bulanık mantık tabanlı [77] yöntemler kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 1.15'te Wu ve ark. [76] tarafından geliştirilen bilgisayar destekli sistemde RANSAC yöntemi ile global tutarlılığın sağlanması gösterilmiştir.



Şekil 1.15. RANSAC yöntemi ile global tutarlılığın sağlanması [76].

Şekil 1.18'de hatalı eşleşen anahtar noktalar elendikten sonra bir parçanın referans banknottaki konumu isabetli bir şekilde belirlenmiştir. Global tutarlılık sağlandıktan sonra parçalar boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilmektedir [38, 51, 76, 77].

(d) Çıkış görüntüsünün elde edilmesi (Parçaların bir araya getirilmesi)

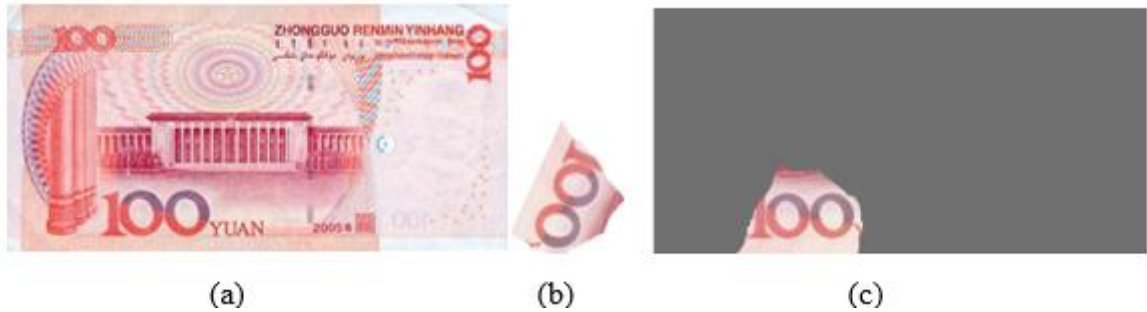
Parçalar referans banknotta ait oldukları konumlara göre hizalanarak boş bir çerçeveye yerleştirilmektedir [38, 51, 76, 77]. Bu aşamada üç farklı alt problem ile karşılaşmaktadır. Bunlar parçaların isabetli bir şekilde hizalanması için döndürülme açılarının hesaplanması, yerleştirme işleminde parçaya ait piksellerin belirlenmesi ve birden fazla banknotun yeniden oluşturulması söz konusu ise aynı banknota ait parçaların belirlenmesi şeklindedir. Bu alt problemlerin çözümlerine yönelik önerilen yaklaşımlar aşağıda verilmiştir.

1. Parçaların hizalanma problemi

Parçaların rotasyon açılarının tahmini, doğru eşleşen anahtar noktaların konumları üzerinden yapılmaktadır [38, 51, 76, 77]. Hizalanma probleminin aşılması için Wu ve ark. [76] RANSAC yönteminden Li ve ark. [51] MSAC yönteminden faydalanmıştır. Gwo ve ark. [77] ise yeni bir rotasyon açısı tahmin metodu önermiştir. Fakat araştırmacıların [77] önerdiği rotasyon açısı tahmin metodunda parçaların hangi yönde döndürülmesi (saat yönü veya tersi yönde) gerekeceği ile ilgili herhangi bir açıklamaya rastlanmamıştır.

2. Parçaya ait piksellerin belirlenmesi

Parçalara ait piksellerin kolay bir şekilde ayrıştırılması için parçaların taratılma sürecinde tek renk içeren arkaplanlar kullanılmaktadır. Parçalara ait görüntüler ön ve arka olmak üzere ikiye bölütlenerek parçaya ait pikseller belirlenmeye çalışılmaktadır. Parçalara ait pikseller oluşturulan boş bir çerçeveye kopyalanarak parçalar bir araya getirilmektedir. Oluşturulan boş çerçevenin boyutları ilgili referans banknot ile aynı boyutlara sahiptir [38, 51, 76, 77]. Örnek olarak Şekil 1.16'da Li ve ark. [51] tarafından önerilen bilgisayar destekli sistemde bir banknot parçasının boş bir çerçeveye yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.16. (a) Referans banknot (b) rotasyona uğramış parça (c) parçanın hizalanarak boş çerçeveye yerleştirilmesi [51]

Şekil 1.16'da verildiği gibi parçalar referans banknotta ait olduğu konuma göre bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilmektedir. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 76, 77] tek renk içeren arkaplanlar (siyah) kullanılması sayesinde parçaya ait piksellerin kolay bir şekilde ayrıştırıldığını belirtilmiştir. Fakat parçalara ait görüntülerin ikiye bölütlenmesinde kullanılan yaklaşımlar ile ilgili açıklamalar yapılmamıştır. Parçalara ait piksellerin belirlenmesinde tek renk arkaplanların kullanılması oldukça avantaj sağlamaktadır. Fakat tek başına yeterli değildir. Örneğin banknot

parçalarının yüzeylerinde siyah renkli yazı, doku vb. içerikler olabilmektedir. Bu durumda parçalara ait pikseller isabetli bir şekilde belirlenemeyecektir. Ayrıca parçaların dijital hale getirilme sürecinde tarayıcılar arkaplan rengini tek renk kodunu verecek şekilde üretemeyebilir. Bununla birlikte arkaplan rengi tek renk olarak (siyah) tercih edilse bile farklı marka tarayıcılar kullanıldığında üretilen arkaplan renk kodu aynı olmayabilir [81]. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 76, 77] söz konusu alt problemlerin çözümüne yönelik yaklaşımlar ortaya konmamıştır.

3. Çoklu yeniden oluşturma sürecinde global tutarlılığın sağlanması

Aynı nominal değere sahip birden fazla parçalanmış banknotun yeniden oluşturulmasında global tutarlılığın sağlanması için yaklaşımlar geliştirilmiştir [51, 76, 77]. Bir parçanın çerçeveye yerleştirileceği bölgede daha önce başka bir parça yerleştirilmişse söz konusu parçanın başka bir banknota ait olduğu varsayımını yapılmıştır [51, 76, 77]. Wu ve ark. [76] tarafından parçaların çerçeveye yerleştirilmesi bir optimizasyon problemi şeklinde ele alınmıştır. Parçaların üst üste binme durumunun en aza indirilmesi ve parçalanmış banknotun yeniden oluşturma sürecinin iyileştirilmesi için dışbükey ikinci dereceden programlama (convex quadratic programming) [82] yaklaşımından faydalanılmıştır. Li ve ark. [51] ise problem çözümünde şekil tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşımda çerçeveye yerleştirilen bir parçanın sınırları çıkarılmaktadır. Söz konusu parçanın sınırları ile çerçeveye yerleştirilecek diğer parçanın sınırları konumsal olarak birbirleriyle karşılaştırılmaktadır. Aday parça çiftinde konumsal komşuluk varsa ve parçaların üstü üste binme durumu yoksa bu parçalar global tutarlılığı sağlamaktadır. Eğer aday parça çiftinde üst üste binme durumu varsa söz konusu parçalar global tutarlılığı sağlamamaktadır.

Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde çoklu yeniden oluşturma süreçlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Parçaların yalnızca sınırlarından faydalanarak global tutarlılığın sağlanması problem çözümünde yeterli olmayabilir. Bununla birlikte yerleştirme sürecinde parçaların üst üste binme durumlarının belirlenmesi için öncelikle parçalara ait piksellerin isabetli bir şekilde belirlenmiş olması gerekir. Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde parçalara ait piksellerin belirlenmesi aşamasında karşılaşılan alt problemlerin çözümüne yönelik herhangi bir yaklaşım önerilmemiştir.

Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerin [38, 51, 76, 77] problemi çözüm süreleri rapor edilmemiştir. Ayrıca problem çözümünde kullanılan verisetleri kapsamlı değildir.

Dolayısıyla söz konusu bilgisayar destekli sistemler, daha kapsamlı verisetleri üzerinde test edilmeli ve performanslarının ortaya konması gerekir.

1.6. Bilgisayar Destekli Sistemlerin İlgili Oldukları Alanlara Göre Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında daha önce bilgisayar destekli sistemlerin genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Fakat parçalanmış 2B nesnelerin yeniden oluşturulması; adli bilim, restorasyon ve multimedya uygulamaları gibi birçok farklı alanı ilgilendirmektedir [9, 18, 53, 71, 73]. Dolayısıyla problem çözümünde ayrıca ele alınacak birçok farklı alt problem ortaya çıkabilmektedir. Örneğin adli bilimi ilgilendiren bir parçalanmış nesnenin yeniden oluşturulmasında parçalara en az temas yapılarak problemin çözülmesi büyük önem arz edecektir. Çünkü parçalara fiziksel temas, delillerin (parmak izi, biyolojik deliller vb.) yok edilmesine yol açabilir. Restorasyon alını ilgilendiren parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında parçalara yapılacak fiziksel temaslardan çok görsel bütünlüğün sağlanıp sağlanmadığı önem arz edecektir. Bu kısımda bilgisayar destekli sistemler ilgili olabilecekleri alanlara göre irdelenmiştir ve literatürdeki boşluklar ortaya konmuştur.

Parçalanmış kâğıt türündeki nesnelerin (belge, fotoğraf, banknot vb.) yeniden oluşturulması adli bilim alanında ele alındığında çözülmesi gereken bazı alt problemler tespit edilmiştir. Söz konusu alt problemler: parçaların kenarlarında soyulmalar olduğunda parçaların birleştirilme güçlüğüne azaltılması, parçalarda buruşukluk olduğunda parçaların düzeltilmeden problem çözümünün gerçekleştirilmesi, eşleştirme sürecindeki kombinasyonların azaltılması ve çift taraflı basılı parçalanmış belgelerin yeniden oluşturulmasında parçalara en az temas sağlanması için taratılma işlem yükünün azaltılması şeklindedir. Literatürde De Smet [83] tarafından adli bilimi ilgilendiren parçalanmış belgelerin manuel ya da yarı otomatik sistemler ile yeniden oluşturulmasında işlem yükünün azaltılmaya çalışılmıştır. Belgelerin parçalanma sırasındaki yırtılma kombinasyonları çıkartılmıştır. Oluşan kombinasyonları değerlendirerek problem çözümünde bazı parçaların birbirleriyle eşleştirilmesinin gerekli olmadığını ortaya konmuştur. Roy ve ark. [25] ise delillerin nasıl bir parçalanma biçimi ile yok edilmeye çalışıldığını tespit etmek için iki deney grubu oluşturmuştur. Birinci deney grubundan sadece fotoğrafların elle parçalanması istenmiştir. Diğer deney grubundan ise fotoğrafların adli bilim tarafından delil arz edecek kısımlarının yırtılması istenmiştir. Çalışmada adli

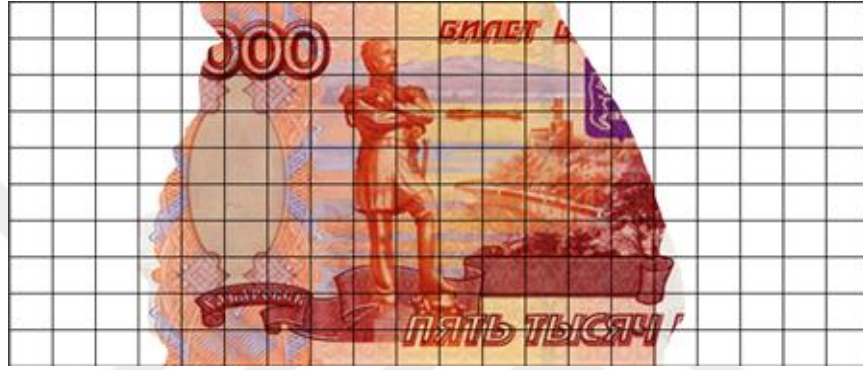
bilim uzmanlarında yardım alınmıştır ve toplamda 400 adet fotoğraf parçalanmıştır. Parçalanmış fotoğraflar geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulmaya çalışılmıştır. Fakat bu çalışmada oluşturulan veri seti İnternet ortamında paylaşılmamıştır. Biswas ve ark. [84] tarafından geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile kenarlarında soyulmalar olan parçalar bir araya getirilmeye çalışılmıştır. Fakat parça kenarlarında soyulmalar arttığında söz konusu bilgisayar destekli sistem yetersiz kalmaktadır. Ayrıca geliştirilen sistem çoklu yeniden oluşturma işlemlerini gerçekleştirememektedir. Literatürde delil parçalarında buruşukluk olduğunda veya delil parçalarının her iki yüzünde içerik olduğunda problem çözümünün nasıl gerçekleştirileceği ile ilgili herhangi bir yaklaşıma rastlanmamıştır.

Parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması adli bilimler veya bankacılık alanını ilgilendirmektedir [76, 77]. Söz konusu problem bankacılık alanında ele alındığında yeniden oluşturulma işlemi banknotların yüzeylerinde kayıp oranlarının belirlenmesi önem arz edecektir. Çünkü çeşitli ülkelerin merkez bankaları, yeniden oluşturulmuş banknotarı kabul etmekte ve ödemeler yapmaktadır. Örneğin banknotlardaki kayıp oranı Rusya'da %45'in altında olması durumunda merkez bankaları tarafından söz konusu banknotun değişimi kabul edilmektedir [85, 2019]. Rusya'da bankalarda banknotun yüzeyindeki kayıp oranını manuel olarak hesaplayan pratik bir metodun adımları aşağıda verilmiştir [86, 2019].

1. Referans olarak sağlam bir banknot alınır ve ızgara yapısındaki bir alana konur. Banknotun orijinal yüzey alanındaki toplam kare sayısı (T_s) hesaplanır (Şekil 1.17.a).
2. Kayıp oranı testi yapılacak banknot, ızgara yapısındaki bir alana konur (Şekil 1.17.b)
3. İçi tam dolu olan kareler (S_f) sayılır.
4. İçi tam dolu olmayan kareler (S_p) sayılır (Şekil 1.17.c).
5. Banknotun sağlam yüzey alanı (S_c) = $\frac{S_p}{2} + S_f$ kare şeklinde hesaplanır.
6. Banknotun yüzeyindeki kayıp oranı (S_l) = $100 - \left[\left(\frac{S_c}{T_s} \right) * 100 \right]$ olarak tespit edilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.17. (a) Sağlam bir banknotun ızgara yapısındaki bir alana yerleştirilmesi
 (b) tahribata uğratılmış bir banknotun ızgara alanına yerleştirilmesi
 (c) içi tam dolu olmayan karelerin tespit edilmesi [86].

Şekil 1.17.a'da banknotun orijinal yüzey alanındaki kare sayısı T_S , 200 (10x20) olduğu görülmektedir. Şekil 1.17.b'de tahribata uğramış 5000 rublede içi tam dolu olan kareler S_f , 97 tanedir. Bu banknotta içi tam dolu olmayan kareler S_p , Şekil 1.17.c'deki gibi tespit edildiğinde toplam kare sayısı 24 tanedir. Banknotun sağlam yüzey alanı $S_c = \frac{24}{2} + 97 = 109$ olarak hesaplanır. Bu durumda Banknotta kayıp oranı S_l aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$(S_l) = 100 - \left[\left(\frac{S_c}{T_s} \right) * 100 \right] = 100 - \left[\left(\frac{109}{200} \right) * 100 \right] = \%45.5 \text{ kayıp oranına sahiptir.}$$

Tahribata uğramış 5000 Rublenin kayıp oranı %45'ten fazla olduğu için Rusya Merkez Bankası tarafından değişimi kabul edilmeyecektir [85, 2019].

Parçalanmış banknotların bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulmasında merkez bankaları tarafından banknotların yüzey alanındaki kayıp oranları dikkate alınmıştır [76, 77]. Gwo ve ark. [77] Avustralya merkez bankası [87, 2019] tarafından konulan kriteri örnek göstermiştir. Araştırmacılar, bilgisayar destekli sistemin bir banknotun en az %80'nini yeniden oluşturulması gerektiğini belirtmiştir. Wu ark. [76] ise geliştirilen bilgisayar destekli sistemin başarılı olarak değerlendirilmesi için bir banknotun %75'ten fazlasını yeniden oluşturulması gerektiğini belirtmiştir. Fakat literatürde parçalanmış banknotların yeniden oluşturulmasında banknotların yüzey alanlarındaki kayıp oranını hesaplayan bilgisayar destekli yaklaşımlar önerilmemiştir. Bununla birlikte bir banknotun yüzey alanında kayıp oranı merkez bankaları tarafından belirlenen kriterlerin altında olabilir. Fakat söz konusu banknot bilgisayar destekli sistem ile isabetli bir şekilde yeniden oluşturulabilir. Ayrıca parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması adli bilimi ilgilendiren bir problem olabilir. Bu durumda bilgisayar destekli sistemlerin başarı oranını belirleyecek farklı yaklaşımların geliştirilmesi ihtiyaç vardır.

Literatürde parçalanmış sanat eserlerinin yeniden oluşturulması için geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde (referans görüntü kullanmayan) genellikle parçaların şekil, renk ve doku özelliklerin faydalanılmıştır. Fakat sanat eserlerinin yüzeylerinde çeşitli tahribatlar (aşınmalar vb.) olabilmektedir. Bu durumda problemlerin bilgisayar destekli sistemler ile çözülmesi için yeni yaklaşımların ortaya konması gerekir. Literatürde bu konuda az sayıda çalışma yapılmıştır. Skembris ve ark. [75] fresk parçalarının bir araya getirilmesinde renk bilgisi haricinde tematik içeriklerden faydalanmıştır ve daha önceki çalışmalarında geliştirdiği [50] bilgisayar destekli sistemin başarı oranını arttırmıştır. Franklin ve ark. [88] ise fresklerin yüzeylerinde fırça darbeleri, çatlaklar, erozyonlar vb. durumları inceleyerek parçaların eşleştirilmesinde kullanılacak içerik özellik çeşitini arttırmıştır. Restorasyon sürecinin tamamlanması için bilgisayar destekli sistemlerin çözmesi gerekeceği başka alt problemler de vardır. Örneğin yeniden oluşturulan sanat eserlerinde tahribatlardan dolayı parçaların birleşim yerinde boşluklar ve parça yüzeylerinde çatlaklar, aşınmalar vb. olabilmektedir. Bu nedenle yeniden oluşturulan sanat eserlerinde oluşan tahribatların onarılması gerekmektedir. Günümüzde hatalı restorasyonlar yapılarak sanat eserleri zarar görebilmektedir [89, 2019]. Dolayısıyla

geliştirilecek bilgisayar destekli sistemler ile yapılacak onarımla işlemleri sayesinde restorasyon sürecinde yaşanabilecek hatalar azaltılmıştır olacaktır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında geliştirilen bilgisayar destekli sistem, parçalanmış 2B nesnelerin yeniden oluşturmasını gerçekleştirmektedir. Yeniden oluşturulma süreçlerinde parçalanmış nesnelere ilgili referans görüntülerden faydalanılmıştır. Parçalanmış bir nesnenin benzer özelliklerde kopyaları mevcut ise söz konusu nesnenin referans görüntüsü kolay bir şekilde elde edilebilir. Örneğin banknot, bilet gibi nesnelere bu türlerdendir. Parçalanmış nesne, sanat eseri (fresk vb.) ise söz konusu nesnenin referans görüntüsüne erişmek daha zor olabilmektedir. Fakat günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte sanat eserlerinin orijinal hallerine ait fotoğraflarla ilgili veritabanları her geçen gün artmaktadır. Bu duruma örnek; akademik çevrede (özellikle fotogrametri alanında) yapılan araştırmalara paralel olarak kültürel mirasların çağdaş fotoğrafçılık teknikleri ile dijital ortamlarda belgelenme/kataloglanma sayısındaki artış gösterilebilir. Söz konusu kataloglanma işlemleri, restorasyon projeleri ve eserlere yapılacak müdahale kararlarını daha hassas bir şekilde yapabilmek için fotogrametrik teknikler veya lazer tarayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmektedir [90]. Bununla birlikte fotoğrafçılık işlemi; özellikle fresk (duvar resimleri) gibi kendine özgü hassasiyeti olan eserlerin zaman içinde engellenemeyen eskimelerinden/yaşlanmalarından kaynaklanan bozulmaları gözlemlemek için de kullanılmaktadır [91]. Başka bir ifadeyle fotogrametrik tekniklerin kullanılması tarihi eserlerin eski halleri ile ilgili en gerçekçi fotoğraflara, bilgilere (içerdikleri figürler, süs eşyaları, ayrıntılar ve gerçek boyutlarına) erişebilmek anlamına gelmektedir (Şekil 2.1) [91]. Güleç ve ark. [92] 2006 yılında yaptıkları çalışmada; kültürel miras açısından zengin olan ülkemizde fotogrametri yöntemlerinin az kullanıldığını fakat yakın bir gelecekte restorasyon projelerinde söz konusu bu tekniklerin kullanılmasının yaygınlaşacağını belirtmiştir. Fotogrametrik teknikleri ve lazer tarayıcılar kullanarak çekilen bazı sanat eserlerine ait fotoğraflar örnek olarak Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Ortofoto (ortophoto) olarak çekilmiş bir sanat eseri [91] (b) Lazer tarayıcılarla İtalya’da bir eserin fotoğraflanması [93].

Şekil 2.1’de verilen ortofoto, duvar resimleri gibi eserlerin detaylı bir şekilde (içerdikleri figürler, süs eşyaları, ayrıntılar ve boyut uzunları vb.) fotoğraflanmasını sağlayan bir fotoğrafma yöntemidir [90].

Günümüzde arşiv kayıtlarının dijital hale getirilmesi yönünde çalışmalar her geçen gün artmaktadır [94]. Dolayısıyla parçalanmış belge, gazete, kitap vb. nesnelere ilgili referans görüntülere erişilebilir. Ayrıca gelişen teknoloji ile birlikte fotoğraf makineleri ve cep telefonlarının görüntü kalitesi yükselmekte ve İnternet ortamında fotoğraf paylaşımları artmaktadır. Dolayısıyla günümüzde parçalanmış nesnelere ilgili referans görüntülere erişmek çok daha mümkün olmaktadır.

Yeniden oluşturulma süreçlerinde referans görüntülerden faydalanılması problem çözümünü hızlandırmakla birlikte yapılacak hataları azaltacaktır. Literatürde orijinal hali bilinen sanat eserlerinin yeniden oluşturulmasıyla ilgili Fornasier ve Toniolo [18] tarafından yapılan çalışmadan başka çalışmaya rastlanmamıştır. Günümüzde artan terör olayları ve yaşanan savaşlar düşünüldüğünde; sanat eserlerini, yeniden oluşturacak yöntemlere olan ihtiyaç daha da artmaktadır. Bu tez kapsamında parçalanmış nesnelere ilgili yeni bir bilgisayar destekli sistem geliştirilmiştir. Önerilen bilgisayar destekli sistem ile literatüre yapılan katkılar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. 2B yapboz problem türüleri ve geliştirilen bilgisayar destekli sistemler kapsamlı bir şekilde ilk defa sınıflandırılmıştır.
2. Parçalanmış nesnelere yeniden oluşturulması ile ilgili veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti ile çift yüzlü yapboz problemi, görüntü farklılığı,

parçalarda oluşan tahribatlar ile ilgili problemler ele alınmıştır. Ayrıca farklı tip nesnelere (kartpostal, banknot, fresk, fotoğraf ve bilet) parçalanarak problem çözümünde ele alınan görüntü çeşitliliği artırılmıştır.

3. Eşleştirme işleminde anahtar nokta tabanlı yöntemlerden faydalanılmıştır. Yapılan çalışmalarda [38, 51, 76, 77] kullanılan SIFT yöntemi [78] ile diğer anahtar nokta tabanlı SURF [95], BRISK [96] ve AKAZE [97] yöntemleri karşılaştırılmıştır. Görüntü farklılığı problemi ele alınmıştır. Hangi yöntemin kullanılacağına karar vermek için Borda sayısına [98] dayalı bir seçim yaklaşımı önerilmiştir. Borda sayısı tabanlı yaklaşım tarafından seçilen anahtar nokta tabanlı yöntem, yüksek başarı oranında sonuçlar vermiştir. Ayrıca anahtar nokta tabanlı yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlar için blok tabanlı yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece eşleştirme işlemi güçlendirilmiştir.
4. Parçaların yerleştirilme sürecinde yeni bir rotasyon açısı tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen rotasyon açısı tahmin yöntemi literatürde önerilen rotasyon açısı tahmin metodu ile karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında geliştirilen rotasyon açısı tahmin yöntemi, parçaları daha başarılı bir şekilde hizalamıştır.
5. Parçaların çerçeveye yerleştirilme sürecinde parçalara ait piksellerin belirlenmesi için CIELab [99] tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile tarayıcılardan kaynaklanan renk problemlerinin üstesinden gelinmiştir.
6. Çoklu yeniden oluşturulma problemleri ele alınmıştır. Global tutarlılığın sağlanması şekil ve içerik tabanlı yaklaşım ile iyileştirilmiştir.
7. Parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması bu çalışma ile ilk defa çift taraflı yapboz problemi şeklinde ele alınarak çözülmüştür.
8. Bu çalışma ile nesnelere ait parçaları kendi içlerinde gruplandıran bir yöntem literatürde ilk kez önerilmiştir. Gruplandırma işlemi ile problem çözümünün hızlandırılacağı ortaya konmuştur.
9. Parçalanmış nesnelere yeniden oluşturulması ilgili oldukları alanlara göre ele alınmıştır. Problem çözümünde karşılaşılan alt problemlerin bir kısmı için çözüm önerileri sunulmuştur. Söz konusu çözüm önerileri ile bilgisayar destekli sistemin başarı oranı ortaya konmuştur. Geliştirilen bir yaklaşım ile parçalanmış nesnelere kayıp oranı hesaplanmıştır. Yeniden oluşturulan sanat eserlerinin onarılması yapılarak görüntü özelliği iyileştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar; geliştirilen bilgisayar destekli sistem, yeniden oluşturulma süreçlerinin hızlandırılması ve yeniden oluşturma sonuçlarının ilgili oldukları alana göre değerlendirmesi şeklinde üç başlık altında açıklanmıştır.

2.1. Geliştirilen Bilgisayar Destekli Sistem

Bu tez kapsamında geliştirilen bilgisayar sistem; 4 ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada nesnelere ait parçalar dijital hale getirilmekte ve parçalanmış nesne ile ilgili referans görüntüler elde edilmektedir. Daha sonra parçalar referans görüntü ile eşleştirilmektedir. Diğer aşamada eşleştirme işleminde global tutarlılık sağlanmaktadır. En son aşamada ise parçalar referans görüntüde ait oldukları yerlere göre boş bir çeyeve yerleştirilmektedir. Ana aşamaların detayları aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1. Veri setinin Oluşturulması

Literatürde yeniden oluşturma süreçlerinde referans görüntüler kullanan bilgisayar destekli sistemlerin kullanıcıları veri setlerinin hiçbiri İnternet ortamında paylaşılmamıştır. Bu neden çalışmada ilk etapta kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setinde parçalanmış nesnelere yeniden oluşturulmasını zorlaştıran alt problemler ele alınmıştır. Verisetleri gerçek ve sentetik olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmıştır. Verisetleri ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

2.1.1.1. Gerçek Veri Setleri

Banknot, bilet, fotoğraf ve karpostalların elle parçalanması sonucu oluşturulmuştur. Daha sonra parçalar, tarayıcılar yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Parçaların her birine numara verilmiştir. Dijital haline getirilen parçalar 96 ve 300 dpi çözünürlüğe sahip ve jpg formatındadır. Parçalanmış nesnelere ilgili referans görüntüler elde edilmiş ve referans görüntülerin boyutları, parçalar ile arasında ölçekleme problemi olmayacak şekilde ayarlanmıştır. Parçalanmış nesnelere yeniden oluşturulmasını zorlaştıran alt problemler maddeler halinde aşağıda açıklanmıştır.

(a) Tarayıcılardan kaynaklanan renk problemleri

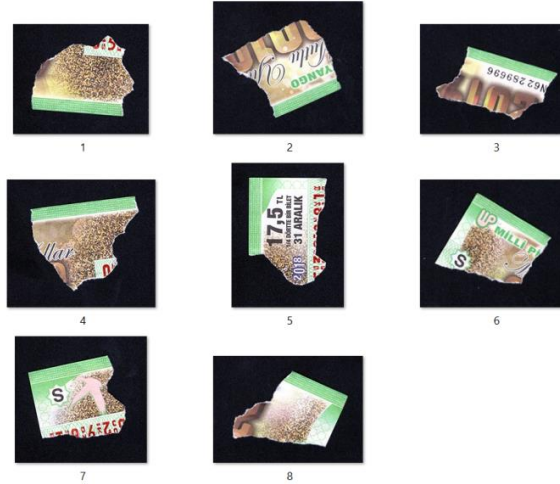
Bu verisetinde parçaların bilgisayar ortamına aktarılmasında farklı marka ve modelde tarayıcılar kullanılmıştır. Kullanılan tarayıcılar Kyocera UTAX 5555i, Epson Perfection V19 ve Brother dcp-j105 tarayıcılardır. Böylece parçalara ait piksellerin belirlenmesi için bu tezde geliştirilen yaklaşımın başarısı, farklı tarayıcılar üzerinde test edilebilmiştir. Örnek olarak Şekil 2.2’de Kyocera UTAX 5555i ve Brother dcp-j105 markalı tarayıcılar ile parçaların dijital hale dijital hale getirilmesi gösterilmiştir.



(a)



(b)

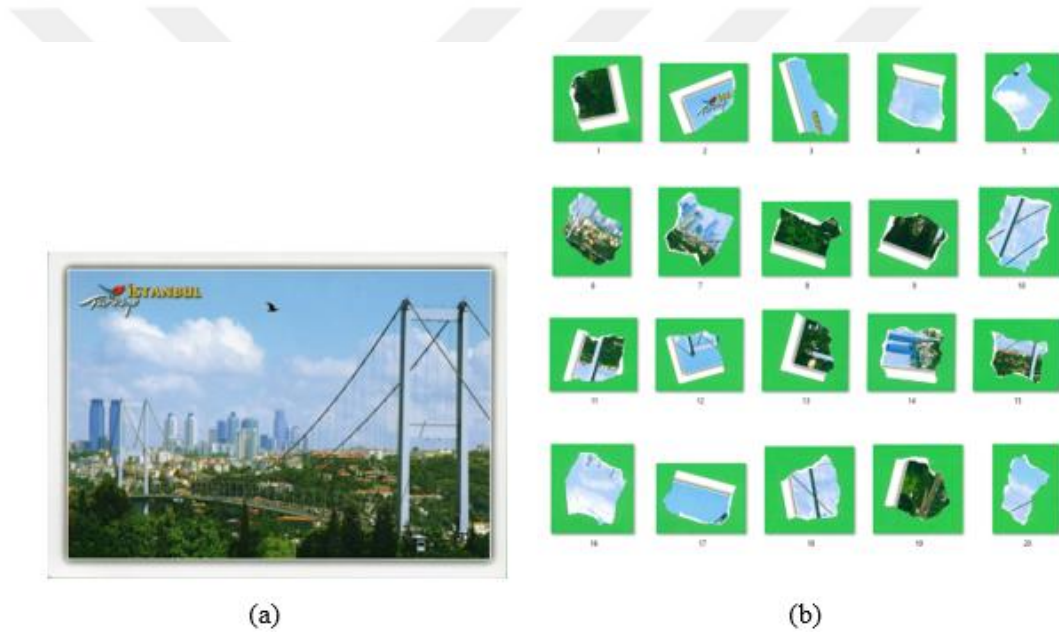


(c)

Şekil 2.2. (a) Referans bilet (b) Kyocera UTAX 5555i (c) Brother dcp-j105 markalı tarayıcılar ile parçaların dijital hale getirilmesi

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi farklı markalı tarayıcılar ile taratılan parçaların arkaplan görüntülerindeki siyah ton değerinde farklılık olmaktadır. Bu veri setinde 15 adet bilet, elle 8 ile 11 arasında parçalara ayrılmıştır.

Literatürde geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 73, 77] parçalara ait piksellerin belirlenmesi için yeşil veya siyah arkaplan renkleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada da veri seti oluştururken parçaların arkaplan görüntüsünde siyah ve yeşil renkler kullanılmıştır. Böylece parçalara ait piksellerin belirlenmesi için önerilen yaklaşımının başarısı, farklı arkaplan görüntüleri üzerinde test edilebilmiştir. Şekil 2.3 ‘te bir kartpostal parçalarının dijital hale getirilmesi gösterilmiştir.

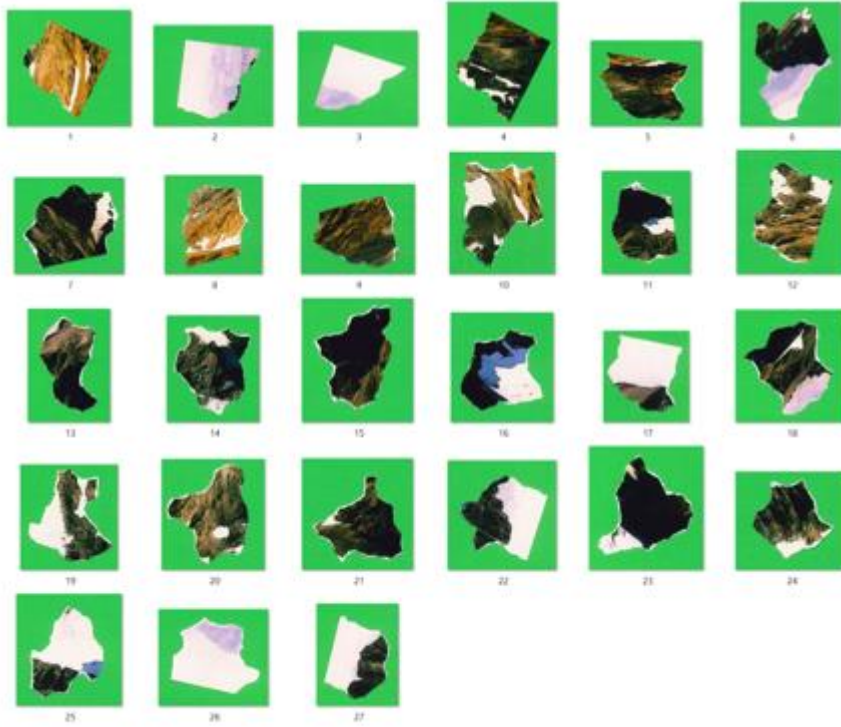


Şekil 2.3. (a) Referans kartpostal (b) kartpostal parçalarının dijital hale getirilmesi

Şekil 2.3’deki gibi bir kartpostal elle 20 parçaya ayrılmıştır. Bu veri setinde 9 adet kartpostal, elle 12 ile 20 arasında parçalara ayrılmıştır. Şekil 2.4’te bir fotoğraf parçalarının dijital hale getirilmesi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.4. (a) Parçalanmış fotoğraf ile ilgili referans görüntü (b) fotoğraf parçalarının dijital hale getirilmesi

Şekil 2.4'te kartpostal olarak satılan bir fotoğraf elle 27 parçaya ayrılmıştır. Bu veri setinde kartpostal olarak satılan 10 adet fotoğraf kullanılmıştır. Söz konusu fotoğraflar, elle 9 ile 30 arasında parçalara ayrılmıştır.

(a) Çift taraflı yapboz probleminin ele alınması

Bu tez kapsamında banknotlar elle parçalanmıştır. Parçaların ön ve arka yüzü belirlenmeden parçalar tarayıcı ile taratılmıştır. Örnek olarak Şekil 2.5'te bir banknot parçalarının dijital hale getirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Parçalanmış banknotun (a) ön (b) arka yüzüne referans görüntüleri (c) banknot parçalarının dijital hale getirilmesi

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bu tez kapsamında parçalanmış banknotlar ile ilgili iki referans görüntü kullanılmıştır. Parçalanmış banknotlar ile ilgili tek bir referans kullanıldığı takdirde problem çözümünün gerçekleştirilmesi için parçaların her iki yüzü taratılması gerekmektedir. Dolayısıyla taratılma işlem maliyeti artacaktır. Bu tez kapsamında parçaların işlem maliyetinin azaltılması hedeflenmiştir. Böylece parçalanmış banknotların yeniden oluşturulması adli bilim açısından değerlendirildiğinde parçalara fiziksel temas azaltılmış olmaktadır.

Bu verisetinde toplamda 24 adet gerçek banknot elle 4 ile 12 arasında parçalara ayrılmıştır. Parçalanmış banknotların geneli ülkemize ait geçmiş yıllarda kullanılan paralardır. Parçalanmış banknotların referans görüntülerini elde etmek için İnternet ortamında araştırma yapılmıştır. Merkez bankaları, para sahteciliğini önlemek için banknot görüntülerini (üzerlerine "örnektir geçmez" yazarak vb.) koruma altına alarak paylaşmaktadır [100-102, 2018]. Bu nedenle merkez bankalarının dışında İnternette

banknot görüntüleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalarda banknotlar genellikle düşük çözünürlükte (72 dpi, 96 dpi, vb.) ve gerçek boyutlarından farklı boyutlarla paylaşıldığı tespit edilmiştir. Bu veri setinde banknotların bir kısmının referans görüntüleri, İnternet ortamında web sitelerden [103 ve 104, 2018] elde edilmiştir. Bir kısmı ise temin edilen parçalanmamış banknotların taratılarak bilgisayar ortamına aktarılması sonucu elde edilmiştir.

(b) Görüntü farklılığı probleminin ele alınması

Banknotlar günlük hayatta çok sık el değiştirdiği için yüzeylerinde eskime, solma, kirlenme, tozlanma vb. birçok bozulma meydana gelmektedir [105]. Fakat merkez bankaları tarafından sunulan referans görüntülerde böyle bir durum yoktur. Dolayısıyla parçalanmış banknotların yeniden oluşturulmasında kullanılan referans banknot ile banknot parçaları arasında görüntü farklılıkları olmaktadır. Benzer durum diğer nesnelere (bilet, kartpostal vb.) içinde geçerlidir. Örnek olarak Şekil 2.6'da banknot ve biletlerde oluşan görüntü farklılıkları gösterilmiştir.

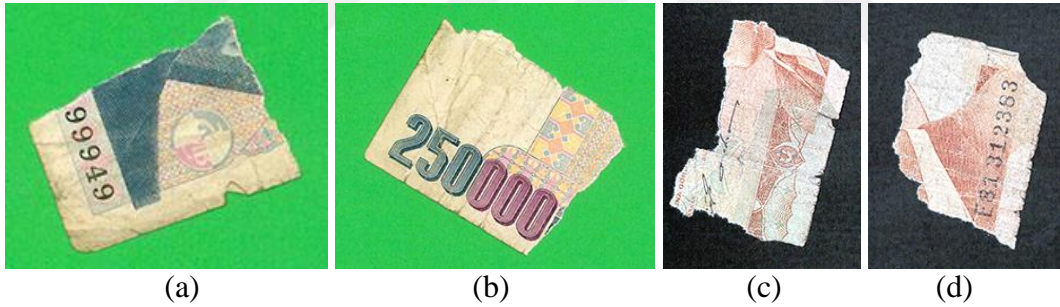


Şekil 2.6. (a) ve (c) Referans banknotlar (b) ve (d) verisetindeki banknotların parçalanmadan önceki görüntüleri (e) referans bilet (f) verisetindeki bir biletin parçalanmadan önceki görüntüsü

Şekil 2.6.a ve görüldüğü gibi referans banknotların yüzeylerinde herhangi bir tozlanma, kırışma, lekelenme vb. tahribatlar yoktur. Şekil 2.6.b'deki banknotun yüzeylerinde kırışma, tozlanmalar vardır. Şekil 2.6.d'deki banknotun üzerine ayrıca yazılar yazılmıştır. Şekil 2.6.e'de bilet ile ilgili referans görüntünün yüzeyleri temizdir. Şekil 2.6.f'deki biletin üzerinde mürekkep lekeleri mevcuttur. Dolayısıyla Şekil 2.6.b, d ve f'deki nesnelere parçalanıp referans görüntüler üzerinden bir araya getirilmeye çalışıldığında görüntü farklılığı eşleştirme işlemini olumsuz etkileyecektir. Bu tez kapsamında oluşturulan veri seti ile görüntü farklılığı problemleri ele alınmıştır.

(c) Parçalardaki tahribat problemlerinin ele alınması

Bu tez kapsamında nesne parçalarının şekil yapılarına göre kendi içlerinde (köşe, kenar ve orta parça olarak) gruplandırılması ele alınmıştır. Gruplandırma işlemini parçaların kompleks bir yapıya sahip olması, parçaların kenarlarında tahribatlar olması vb. alt problemler zorlaştırmaktadır. Söz konusu alt problemler veri setinde ele alınmıştır. Örnek olarak Şekil 2.7'de birkaç örnek verilmiştir.



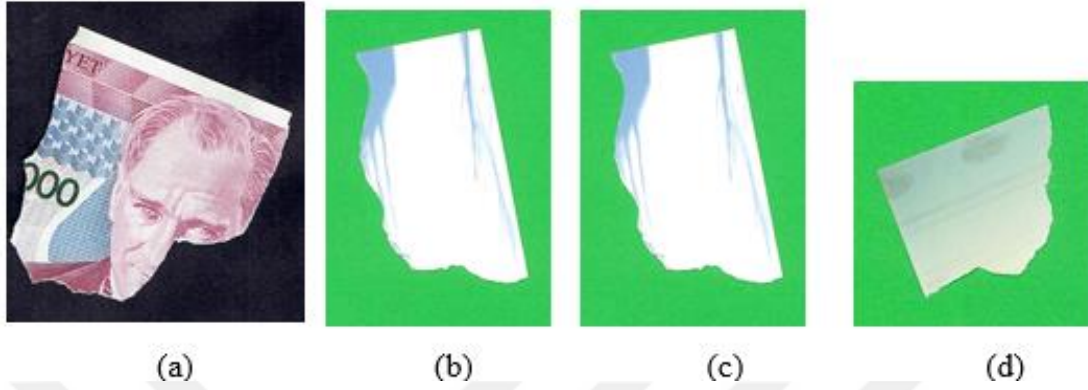
Şekil 2.7. Parçaların kenarlarında oluşan tahribatlar

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi nesne parçalarının kenarlarında hasarlar olmaktadır. Söz konusu tahribatlar parçaların gruplandırılmasını oldukça zorlaştırmaktadır.

(d) Düşük doku özelliğine sahip parçalar

Geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerde [38, 51, 76, 77] banknot parçaları ile referans görüntülerin eşleştirilmesinde anahtar nokta tabanlı yöntem olan SIFT yöntemi kullanılmıştır. SIFT yönteminin etkisi, düşük doku özelliğine sahip bölgelerin eşleştirilmesi durumunda azalmaktadır [106, 107]. Dolayısıyla bu veri setinde görüntü çeşitliliği banknot haricinde bilet, kartpostal, fotoğraf gibi nesnelere ile artırılmıştır. Böylece düşük doku özelliğine sahip parçaların referans görüntüler ile eşleştirilme

problemi ele alınmıştır. Örnek olarak Şekil 2.8’de düşük doku özelliğine sahip parçalar gösterilmiştir.

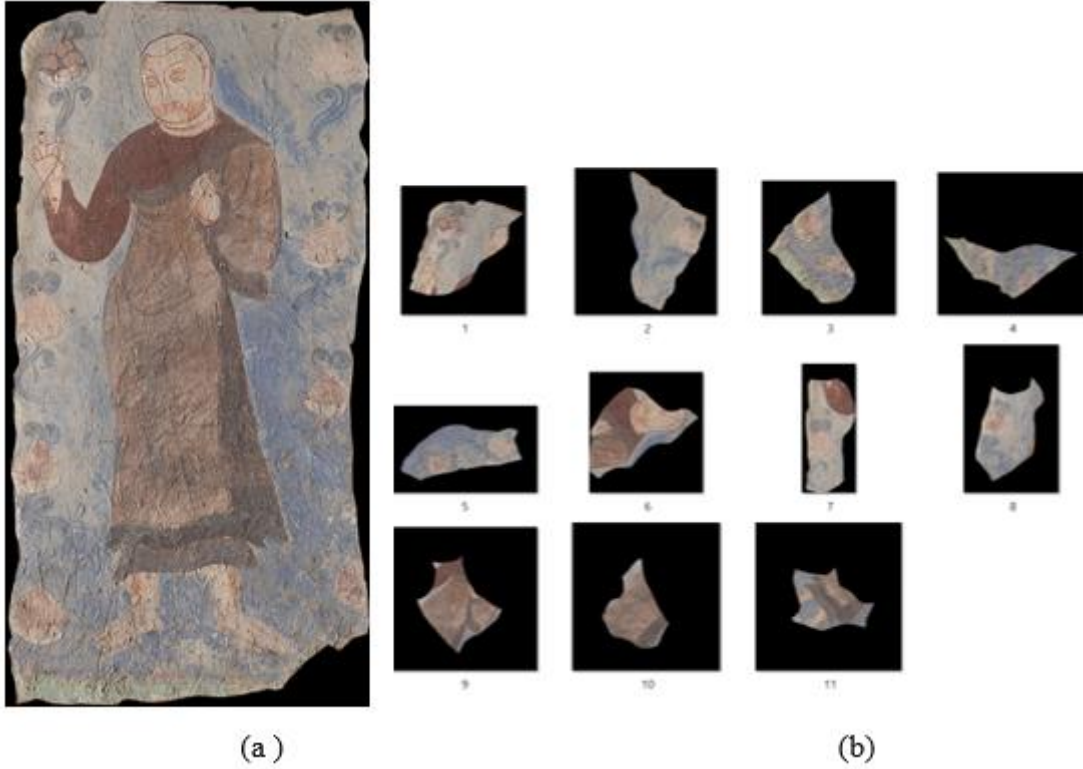


Şekil 2.8. (a) Bir banknot parçası (b)- (d) düşük doku özelliğine sahip fotoğraf parçaları

Şekil 2.8.a’da görüldüğü bir banknot parçasının görüntü içeriği zenginken; Şekil 2.8.b, c ve d’deki fotoğraf parçalarının doku özellikleri zayıftır. Bu tezde ele alınan problem çeşitleri, sentetik veriler oluşturularak daha da genişletilmiştir.

2.1.1.2. Sentetik Veri setleri

Literatürde orijinal hali bilinen parçalanmış gerçek fresklerle ilgili bir veri seti paylaşılmadığından bu tezde parçalanmış fresklerle ilgili sentetik bir veri seti oluşturulmuştur. Sentetik veri seti hazırlanırken İnternette elde edilen fresk görüntüleri, photoshop programı yardımıyla parçalara ayrılmıştır. Şekil 2.9’da parçalanmış fresklerle ilgili oluşturulan sentetik veri setinden bir örnek gösterilmiştir.

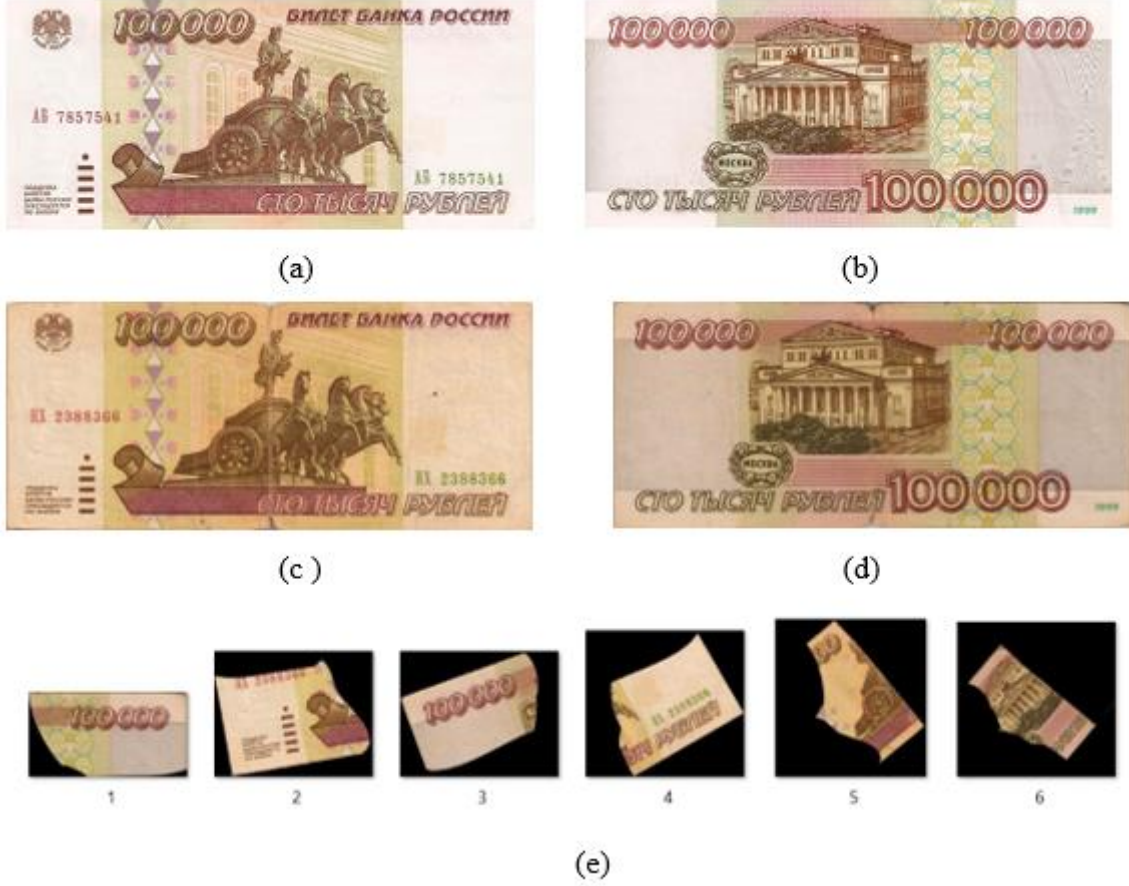


Şekil 2.9. (a) Bir freskin parçalanmadan önceki hali [108, 2019] (b) freske ait parçalar

Veri seti hazırlanırken İnternet ortamında genellikle Şekil 2.9.a'da görüldüğü gibi parça kenarlarında tahribatlar olan fresk görüntüleri seçilmiştir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bir fresk photoshop programı ile 11 parçaya ayrılmış ve elde edilen parçalar çeşitli açılarla rotasyona uğratılmıştır. Bu veri setinde 10 adet fresk parçalanmıştır.

Parçalanmış banknotlarla ilgili veri setleri, sentetik veriler oluşturularak daha da genişletilmiştir. Sentetik verisetinde Türkiye, Rusya ve Amerika Birleşik Devletleri ülkelerine ait 5'er banknot görüntüleri 4-8 arasında parçalara ayrılmıştır. Böylece veri setinde kullanılan banknot çeşitliliği arttırılmıştır. Banknot parçalarının elde edilmesinde iki farklı yol izlenmiştir. İlkinde referans banknot görüntüleri kesilmiştir. Dolayısıyla bu şekilde oluşturulan parçalar ile referans görüntüler arasında görüntü farklılığı yoktur. Diğerinde ise aynı banknotların yıpranmış kirli vb. hallerine ait görüntüler kesilmiştir. Böylece gerçekte olduğu gibi parçalar ile referans alınan banknot arasında görüntü farklılıklarının oluşması sağlanmıştır. Sentetik parçaların oluşturulması tamamlandıktan sonra parçalar rotasyona uğratılmıştır. Parçalar, 10 derecelik açı aralıklarında döndürülmüştür. Her bir parçanın döndürülme açıları veri setinde belirtilmiştir. Bu rotasyon açı bilgileri, parçaların hizalanmasında önerilen yöntemlerin doğruluk testinin

(ground truth) yapılabilmesini sağlamaktadır. Örnek olarak Şekil 2.10'da parçalanan bir banknot görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.10. (a) ve (b) Referans banknotun (a) ön (b) arka yüzü, parçalanan banknotun (c) ön (d) arka yüzü (e) sentetik oluşturulan parçalar

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi referans banknot ile parçalanan banknot arasında görüntü farklılığı vardır. Böylece sentetik banknot parçaları ile referans banknot arasındaki görüntü farklılığı, gerçek banknot parçalarında olduğu gibi oluşturulabilmiştir.

2.1.2. Eşleştirme İşlemi

Bu tez kapsamında parça görüntülerinin referans görüntülerle eşleştirilmesinde anahtar nokta ve blok tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Anahtar nokta tabanlı yöntemler; doku, köşeli hatlar, bölge öge (blob) vb. özellikleri içeren görüntülerin eşleştirilmesinde başarılı sonuç vermektedir [109, 110]. Dolayısıyla düşük doku özellikli parçaları içerisinde

barındıran yeniden oluşturma problemlerinin çözümünde anahtar nokta tabanlı yöntemlerinin etkisi azalmaktadır. Bu nedenle çalışmada düşük doku özelliğine sahip parçaları içerisinde barındıran yeniden oluşturma problemlerinin çözümünü gerçekleştirmek için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem blok tabanlı eşleştirme yöntemi olarak adlandırılmıştır. Çalışmada eşleştirme aşamasında kullanılan yöntemler anahtar nokta ve blok tabanlı olarak iki başlık altında aşağıda açıklanmıştır.

2.1.2.1. Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemler

Literatürde görüntü eşleştirilmelerinin etkili bir şekilde yapılması için anahtar nokta tabanlı yöntemlerden faydalanılmaktadır [109]. Yapılan çalışmalarda [38, 51, 76, 77] banknot parçaları ile referans görüntünün eşleştirilmesi için SIFT [78] yönteminin kullanılması önerilmiştir. Fakat SIFT yöntemi, literatürdeki diğer anahtar nokta tabanlı yöntemler ile herhangi bir kıyaslama yapılmadan önerilmiştir. Ayrıca SIFT yöntemi yalnızca belirli ülkelere (Çin, Tayvan) ait parçalanmış banknotlar üzerinde uygulanmıştır. Anahtar nokta tabanlı yöntemlerinin başarısı ise kullanılan veri setine göre farklılık gösterebilmektedir [109]. Dolayısıyla SIFT yönteminin başarısı bu tez kapsamında oluşturulan veri setleri üzerinde yeniden test edilmiştir. Bununla birlikte SIFT yöntemi; literatürdeki mevcut anahtar nokta tabanlı yöntemler ile karşılaştırılmış ve problem çözümünde en iyi eşleşme sonucu veren anahtar nokta tabanlı yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bölümde iki başlık altında aşağıda açıklanmıştır.

1. Eşleştirme İşleminde Faydalanılan Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemler

SIFT yöntemi, SURF [95], BRISK [96] ve AKAZE [97] anahtar nokta tabanlı yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu yöntemlerin detayları aşağıda açıklanmıştır.

(a) Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşümü-(SIFT)

SIFT, görüntüden özellik çıkarılması için Gauss farkları (DoG) fonksiyonu ve Hessian matrisini kullanır. Bu yöntemde ilk önce ölçek uzayı oluşturulur. Ölçek uzayının oluşturulmasında Gauss filtresi kullanılır. Gauss süzgeçi ile konvolüsyon edilen görüntülerin farkları alınarak Gauss farkları (DoG) elde edilir. Gaussian farkının ekstremum noktaları, görüntüdeki aday anahtar noktaları vermektedir. DoG operatörü yoğun kenardan etkilenmekte ve imgedeki gürültüye karşı hassas olduğu için aday anahtar noktalar arasından hatalı olanlar tespit edilir. Bunun için 2. dereceden Taylor serisi açılımıyla ve Hessian matrisi kullanılır. Bulunan anahtar noktalara rotasyondan

bağımsızlık kazandırmak için yön ataması yapılır. Bunun için her bir anahtar nokta etrafında gradyan büyüklükleri ve yönleri hesaplanır. Bu bölgedeki en belirgin yön, özellik noktasının yönü olarak atanır. Daha sonra anahtar noktalar için tanımlayıcı oluşturulur. Tanımlayıcı oluşturulmasında anahtar noktalar etrafında 16x16 boyutunda bölgeler oluşturulur. Bu bölgeler 4x4'lük bloklara ayrılır. Her bir blok içinde, gradyan yönelimleri 8 kutu içeren histogram oluşturulur. Toplamda her bir anahtar nokta için $4 \times 4 \times 8 = 128$ elemanlı özellik vektörü elde edilir. Tanımlayıcıların eşleştirilmesinde öklid uzaklığına bakılır [78].

(b) SURF (Speeded-Up Robust Features):

SURF, integral görüntüleri ve Hessian matrisini temel almaktadır. İntegral görüntüler, kutu tipi evrişim (convolution) filtrelerin hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. $x=(x,y)$ konumunda bir $I_{\Sigma}(x)$ integral görüntüsü, x nokta ve onun merkezinde şekillenmiş dikdörtgen bir alan içindeki I giriş görüntüsündeki bütün piksellerin toplamıdır. Hessian matrisi görüntü ile Gauss ikinci dereceden türev konvolüsyonuyla gerçekleştirilir. Hessian matrisinin belirleyicisi her piksel konumunda hesaplanır ve determinant değerlerinin yüksek olduğu yerler anahtar nokta olarak tanımlanır. Anahtar noktaları bulduktan sonra bu anahtar noktalar için öznelik tanımlayıcıları elde edilir. Öznelik tanımlayıcısı elde edilirken her anahtar noktanın komşuluk bölgesi 4x4'lük alt bölgelere ayrılır. Daha sonra 2D Haar wavelet tepkisinin her bir alt bölgedeki tepkisi hesaplanır. Her bir tepki 4 boyutlu bir vektör değerini geri döndürür. Bu değerler; yatay ve düşey yöndeki Haar wavelet tepkilerinin toplamını ve de ayrıca her iki yöndeki tepkilerin mutlak değerlerinin toplamını içerir. Böylece her bir anahtar nokta için 64 (4x4x4) boyutlu bir tanımlayıcı vektörü elde edilmiş olur. Tanımlayıcıların eşleştirilmesinde öklid uzaklığına bakılır [95].

(c) İkili Sağlam Değişmez Ölçeklenebilir Temel Noktalar-(BRISK)

BRISK, ölçek uzayını oluşturmak için görüntü piramidini esas alır. Bu yöntemde ilk olarak ölçek uzayındaki her katmanda potansiyel anahtar noktaların yerini tespit etmek için FAST detektörünün performansını artırılmasında kullanılan AGAST metodunu uygulanır. Daha sonra potansiyel anahtar noktalar arasından belirgin olan noktaları bulmak için aynı katmandaki 8 komşuya ve alt ve üst katmandaki 3x3 komşuya göre FAST skorlarını karşılaştırılır. FAST skorlarının yerel maksimumu, anahtar noktalar olarak tanımlanır. Anahtar noktalar bulduktan sonra bu anahtar noktalar için öznelik tanımlayıcıları elde edilir. Öznelik tanımlayıcı oluşturulurken ilk etapta anahtar nokta etrafında eş merkezli

halkalardan bir örnekleme deseni oluşturulur. Desendeki her ilgili daire Gaussian Standart Sapma ile ağırlıklandırılır ve daha sonra belirlenen eşik değeri esas alınarak desendeki tüm örnekleme nokta çiftleri kısa ve uzun mesafe çiftlerine ayrılır. Uzun mesafe çiftler yönelimi tespit etmek için, kısa mesafe çiftler yoğunluk karşılaştırmaları için kullanılır. BRISK'te tanımlayıcılar yoğunluk karşılaştırmaları ile oluşturulur. Yoğunluk karşılaştırılmasında çiftteki birinci ve ikinci noktalar karşılaştırılır. Eğer birinci noktanın yoğunluk değeri ikinciden büyükse çıktı "1" olur, aksi halde "0" olur. Sonuç olarak BRISK, 512 bit uzunluğunda bir tanımlayıcıya sahiptir. Tanımlayıcıların eşleştirilmesinde Öklid uzaklığı yerine Hamming mesafesi kullanılır. Bu işlem ikili tanımlayıcılar arasındaki XOR işleminin toplamı karşılaştırılarak yapılır [96].

(d) Hızlandırılmış KAZE-(AKAZE)

AKAZE metodu, KAZE metodunun geliştirilmiş halidir. AKAZE'de ilk olarak doğrusal olmayan ölçek uzayı oluşturulur. Bunun için hızlı sonuç üreten Fast Explicit Diffusion (FED) matematiksel yapısı kullanılır. Bu kısımda gauss ölçek uzayının sebep olduğu problemlerin üstesinden gelmek istenmiştir. Doğrusal olmayan ölçek uzayından faydalanılarak görüntü bağdaşık bir şekilde bulanıklaştırılır ve bu sayede görüntü detayları korunurken gürültü azaltılır. Daha sonra doğrusal olmayan ölçek uzayındaki her görüntü için bir anahtar noktası çıkarma işlemi gerçekleştirilir. Her görüntünün Hessian matrisi hesaplanır ve normalize edilmiş ölçek faktörüyle çarpılır. Bu ölçek faktörü her görüntü için farklıdır. Daha sonra ölçek uzayındaki extremum noktaları, bulmak için ölçeklendirilmiş Hessian matrisinin determinantını hesaplanır. Matris determinantının önceden tanımlanmış bir eşik değerinden büyük olup olmadığı kontrol edilir. Eğer büyük ise bu nokta 3x3 komşuluğunda maksimum nokta olduğu ortaya konmaktadır. Ardından her potansiyel maksimum noktası için sırasıyla hizasındaki bir üst seviyesine ve hizasındaki bir alt seviyesine, bakılarak noktanın maksimum olup olmadığı tekrar kontrol edilir. Elde edilen maksimum değerler, anahtar nokta olarak değerlendirilir. Daha sonra anahtar noktalara ait özellik tanımlayıcısını elde edilir. Bunun için LDB algoritması, ölçekleme ve rotasyona karşı bağımsız bir sonuç üretecek şekilde modifiye edilerek kullanılır. LDB anahtar noktasındaki alan; 2x2, 3x3 ve 4x4'lük alanlara bölünür. İntegral görüntüler kullanılmasıyla bu alt bölgelerin ortalamalarının hesaplanması hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ancak integral görüntülerin kullanılması özellik çıkarma metodunu dönmeye karşı savunmasız hale getirmektedir. Bu yüzden AKAZE'de LDB algoritmasını dönmeye karşı duyarlı hale getirmek için ana dönme bilgisini kullanılmaktadır. M-

LDB’de, LDB algoritmasında oluşturulan çerçeve ana dönme bilgisine göre döndürülmektedir. Sonuç olarak özellik tanımlayıcısında 486 bitlik özellik vektörü elde edilmektedir. Tanımlayıcıların eşleştirilmesinde aynı uzunluktaki iki dizinin farklı elemanlarının sayısını veren Hamming uzaklığı kullanılır [97].

SIFT, SURF, BRISK ve AKAZE yöntemleri arasından eşleştirme işleminde kullanılacak yönteme karar vermek gerektiğinde; yapılacak tüm test sonuçlarında bariz bir şekilde yalnızca bir yöntemin en başarılı sonuç vermesi beklenir. Böyle bir ihtimalin her zaman geçerli olmayacağı düşünülürse; eşleştirme işleminde hangi yöntemin kullanılacağına karar vermek zorlaşacaktır. Bu çalışmada deney sonuçlarda en başarılı yöntemin net bir şekilde kararlaştırılamayacağını göz önünde bulundurarak yöntem seçimini kolaylaştıracak bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın detayları aşağıda açıklanmıştır.

2. Eşleştirme İşleminde Kullanılacak Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemin Kararlaştırılması

Eşleştirme işleminde kullanılacak anahtar nokta tabanlı yöntemin kararlaştırılması için Borda sayısı yönteminden faydalanılmıştır. Sosyal seçim teorisindeki oylama yöntemlerinden biri olan Borda sayısı metodu, 1784 yılında Jean Charles de Borda tarafından geliştirilmiştir. Modern seçim sistemlerinin gelişiminde önemli katkısı olan Borda sayısı, adayları (alternatifleri) seçmenlerin bireysel tercihlerinin toplamına göre sıralamayı amaçlayan bir yöntemdir. Borda sayısı metodunda seçmen en az tercih ettiği alternatife genelde sıfır puan, bir sonrakine 1 puan ve en çok tercih edilen alternatife de (n-1) puan vermektedir. Burada n alternatif sayısını göstermektedir. Daha sonra alternatifler Borda skorlarına göre sıralanmaktadır. Toplamda en çok borda skoruna sahip alternatif seçimi kazanmaktadır [98]. Borda skoru (2.1)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$B(i) = \sum_{m=1}^M B_m^i \quad (2.1)$$

Burada B_m^i , m. seçmen tarafından belirlenen i. alternatifin tercih sırasını yani aldığı puanı göstermektedir. M ise seçmen sayısını göstermektedir.

Bu tezde Borda sayısı metodu, ele alınan probleme göre uyarlanmıştır. SIFT, SURF, BRISK ve AKAZE metotları birer alternatif (aday), banknotlar ise birer seçmen olarak düşünülmüştür. Puanlama ise yapılan eşleştirme işleminde yöntemlerin doğruluk

(precision) yüzdesi hesaplanarak yapılmıştır. Doğruluk değeri, görüntü eşleştirme yöntemlerini kıyaslamada kullanılan kriterlerinden biridir [111]. En yüksek doğruluk değeri, eşleşen özelliklerin birbiriyle ne kadar alakalı olduğu anlamına gelir [112]. Çalışmada doğruluk yüzdesi (2.2)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Doğruluk (precision)} = \frac{\text{Doğru Eşleşen Anahtar Noktalar}}{\text{Doğru Eşleşen Anahtar Noktalar}} \times 100 \quad (2.2)$$

Banknotların eşleştirilmesinde puanlamada aday (yöntem) sayısı n=4 olduğu için en az doğruluk yüzdesine sahip yönteme 0 puan, bir sonrakine 1 puan ve en çok doğruluk yüzdesine sahip yönteme ise 3 puan verilmiştir.

Örneğin A, B, C, D, E ve F banknotları ilgili referans görüntülerle SIFT, SURF, BRISK ve AKAZE yöntemleri kullanarak eşleştirilsin ve elde edilen doğruluk (precision) yüzdeleri Tablo 2.1'deki gibi olsun.

Tablo 2.1. Banknotların referans görüntüler ile eşleştirilmesi

Banknotlar	SIFT	SURF	BRISK	AKAZE
A	88	70	96	75
B	75	94	81	87
C	85	76	97	91
D	80	84	76	89
E	84	77	72	97
F	96	74	86	80

Tablo 2.1'de en yüksek doğruluk yüzdeleri vurgulanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında hangi yöntemin tercih edileceğine yönelik net bir karara varılamamaktadır. Çünkü tüm sonuçlarda en başarılı doğruluk yüzdesine sahip herhangi bir yöntem mevcut değildir. BRISK ve AKAZE yöntemleri tarafında 2 defa; SIFT ve SURF yöntemleri tarafından birer defa en yüksek doğruluk yüzdeleri elde edilmiştir. Banknotların eşleştirilmesinde hangi yöntemin kullanılacağına karar vermek gerektiğinde başarılı sonuç sayısı en fazla olan yöntem seçilse bile BRISK ve AKAZE yöntemleri arasından yine bir tercih yapmak gerekir. Dolayısıyla eşleştirilme işleminde kullanılacak yönteme karar vermek için bir yaklaşımın geliştirilmesine gerek vardır.

Eşleştirilme işleminde kullanılacak yönteme karar vermek için Tablo 2.1'deki doğruluk yüzdeleri Borda skorlarına dönüştürülmüştür. Hesaplanan Borda skorları, Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Doğruluk yüzdelerinin Borda skorlarına dönüştürülmesi

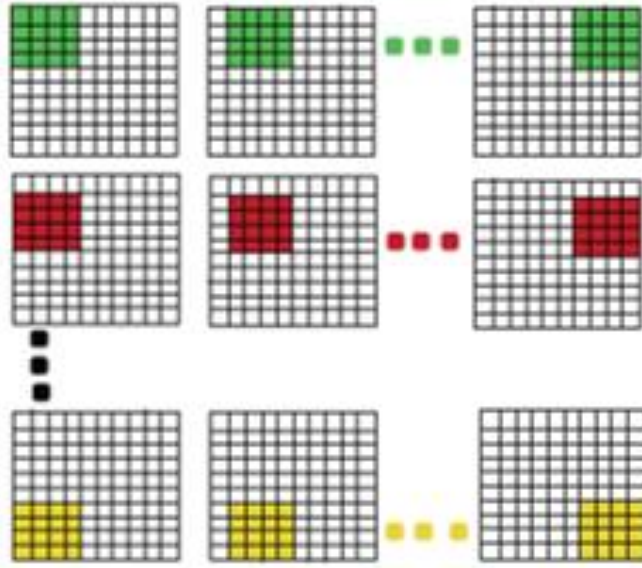
Banknotlar	SIFT	SURF	BRISK	AKAZE
A	2	0	3	1
B	0	3	1	2
C	1	0	3	2
D	0	2	1	3
E	2	1	0	3
F	3	0	2	1
Toplam Borda Skoru	8	6	10	12

Tablo 2.2'de en yüksek Borda skorları vurgulanmıştır. Toplam Borda puanları, (2.1)'deki formül kullanarak hesaplanmıştır. AKAZE yöntemi en yüksek Borda skoruna sahipken SURF yöntemi en düşük Borda skorunu almıştır. Örnek olarak verilen bu sonuçlara göre banknotların eşleştirilmesinde AKAZE yöntemi seçimi kazanmıştır.

2.1.2.1. Blok Tabanlı Yöntemler

Bu tez kapsamında anahtar nokta tabanlı yöntemlerin etkisiz kalabileceği düşük doku özelliği veya tek düze/düz (flat, smooth) görüntü özelliklerine sahip parça görüntülerinin referans görüntüler ile eşleştirilmesi için blok tabanlı alternatif bir yöntem önerilmiştir. Önerilen blok tabanlı yöntem iki ana aşamadan oluşmaktadır. Blok tabanlı yöntemin detayları aşağıda verilmiştir.

Aşama 1: Eşleştirme işleminin daha hızlı bir şekilde yapılması için referans görüntü ve parçalar gri seviyeye dönüştürülür. Daha sonra referans görüntü ve parçalar birer piksel kaydırılarak alt bloklara ayrılmaktadır. Şekil 2.11'de alt bloklara ayırma işlemi, örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Bir imgenin 4x4 büyüklüğünde örtüşen alt bloklara ayrılması

Alt bloklara ayırma işlemi, (2.3)'teki gibi gerçekleştirilmektedir.

$$A_{ij}(x, y) = I(i + x - 1, j + y - 1) \quad (2.3)$$

Burada i . satır ve j . sütundan başlayan ve A_{ij} ile gösterilen her bir blok, birbiri ile örtüşmektedir. x ve y ($1 \dots N$) aralığında değer almaktadır. N alt blok boyutunu ifade etmektedir. Parçalara ait görüntülerde arkaplana ait olan alt bloklar tespit edilerek elenir. Böylece yalnızca parçalara ait pikselleri içeren alt blokların referans görüntüdeki alt bloklar ile eşleştirilmesi gerçekleştirilir.

Aşama 2: Parçalara ait görüntülerde rotasyonlar olmakta ve rotasyon açıları belli değildir. Dolayısıyla önerilecek eşleştirme yönteminin öncelikle rotasyona karşı dayanıklı olması gerekir. Bu nedenle referans ve parça görüntüsündeki alt bloklardan öznitelik vektörü çıkarmak için Hu [113] ve Zernike momentlerinden [114] faydalanılmıştır. Her iki momentlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanarak parçalar ile referans görüntünün eşleştirilmesinde kullanılacak yöntem karar verilmiştir. Söz konusu momentler aşağıda açıklanmıştır.

(a) Hu Momentler

MXN boyutlarındaki bir görüntü; $f(x,y)$ fonksiyonu ile ifade edilsin. Bu sayısal görüntü $P(q+q)$ dereceli 2-D momenti şeklinde aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [113].

$$m_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y) \quad (2.4)$$

Burada p ve q 0,1,2,3, ... şeklinde tamsayılarla ifade edilmektedir ve $(p+q)$ derceli merkez momenti aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\mu_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (2.5)$$

Burada \bar{x} ve \bar{y} (2.6)'daki hesaplanır.

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (2.6)$$

Momentlerin boyutlarına bağlı olarak normalizasyonu yapılmaktadır. Normalize edilmiş merkezi momentler (2.7)'deki formül üzerinden hesaplanır.

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma} \quad (2.7)$$

Burada $\gamma = \frac{p+q}{2} + 1$ eşitliği ile hesaplanır.

Yedi değişmez moment kümesi ikinci ve üçüncü momentlerden elde edilir. Söz konusu moment hesapları aşağıda verilmiştir.

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (2.8)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \quad (2.9)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (2.10)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}\phi_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] \\ &+ (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right]\end{aligned}\quad (2.12)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}\phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] \\ &- (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{12}) \left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right]\end{aligned}\quad (2.14)$$

Referans görüntüde ve parçalardaki alt blokların Hu momenti hesaplanır. Bunun sonucunda her bir alt bloktan 7 elemanlı özellik vektörü elde edilir.

Bir görüntüde alt bloğun Hu momenti alınınca 7 elemanlı bir özellik vektörü elde edilmektedir. Bir parçaya ait görüntüsündeki alt bloklar ile referans görüntüdeki alt blokların eşleştirilmesi (2.15)'teki gibi yapılır.

$$H = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (H_i^{frag} - H_i^{ref})^2} \quad (2.15)$$

Burada H^{frag} parça görüntüsündeki, H^{ref} referans görüntüdeki bir alt bloktan elde edilen Hu moment değerlerini ifade etmektedir. H değeri, Hu moment değerleri arasında öklid uzaklığı alınarak hesaplanmaktadır. En iyi eşleşme sonucunun bulunması için parçadaki bir alt blok, referans görüntüdeki tüm alt bloklar ile eşleştirilir. En küçük H değerini veren referans görüntüdeki alt blok, en iyi eşleşme sonucunu veren alt blok olacaktır.

(b) Zernike Momentler

Zernike momentler; örüntü tanıma [115], içerik tabanlı görüntü erişimi (content-based image retrieval) [116] gibi birçok alanda öznelik çıkarımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Zernike, bir birim çember içindeki ortogonal polinom seti olarak tanımlanır. Zernike polinomlar, (2.16)'daki gibi hesaplanır [117].

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho)e^{jm\theta} \quad (2.16)$$

Burada $R_{nm}(\rho)$ radyal polinomu, n polinom derecesini ve m ise tekrarını ifade etmektedir. ρ , (x, y) koordinatından birim diskin orijinine doğru olan bir vektörün uzunluğudur. θ , x eksenini ile ρ arasında saat yönünün tersi yönünde açı değerini göstermektedir. Kutupsal (polar) koordinat düzleminde radyal polinom (2.17)'de verildiği gibi hesaplanır.

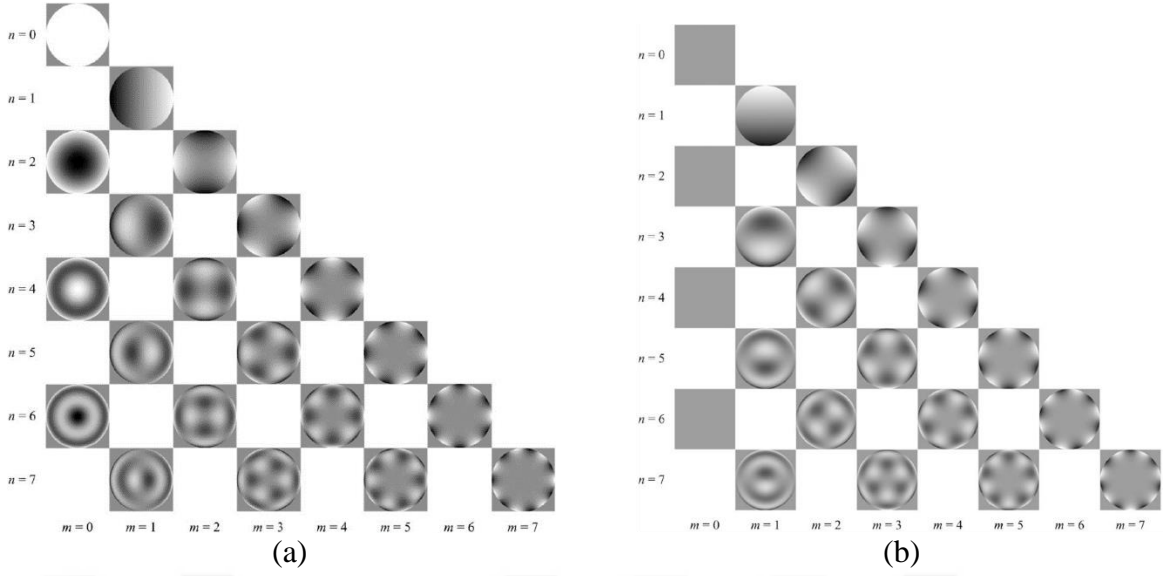
$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-|m|}{2}} \frac{(-1)^s \rho^{n-2s} (n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \quad (2.17)$$

Zernike polinomlarının hesaplanmasında bazı kısıtlamalar vardır. Örneğin n , pozitif bir tamsayı veya sıfır değerini, m ise bir tamsayı değerini almaktadır. Ayrıca $n-|m|$ çift ve $m \leq n$ olmalıdır. Sonuç olarak kompleks Zernike momentleri (2.18)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) V_{nm}^*(\rho, \theta) d\rho d\theta \quad (2.18)$$

Burada * karmaşık eşleniği (complex conjugate) [115, 117] ifade etmektedir.

Örnek olarak n polinom dereci 7 alındığında Zernike momentte radyal polinom çekirdekleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Zernike momente radyal polinom $n=7$ derecesi alındığında elde edilen (a) gerçek (b) sanal kısımlar [117].

Zernike momente radyal polinom, gerçek ve sanal (imaginary) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi Zernike momente bileşen sayısı polinom derecesi $n=7$ alındığında 20 olmaktadır. Fakat Şekil 2.12.b'de görüldüğü gibi $m=0$ olduğunda bileşen değerleri aynı görüntüye sahip olmaktadır. Bir başka ifadeyle yineleme olmadığında imgelerdeki Zernike moment çekirdeklerinin sanal kısımları sıfır olmaktadır. Bu nedenle alt blokların eşleştirilmesinde yinelemenin olmadığı bileşenlerin hesaba katılması gerekmemektedir. Sonuçta eşleştirme işleminde kullanılacak bileşen sayısı 16 olacaktır.

Zernike momentler ile bir görüntünün temsil seviyesi, n polinom derecesinin artırılarak iyileştirilebilmektedir [118]. Bu çalışmada Zernike momentlerin hesaplanmasında n polinom derecesi 7 olarak alınmıştır. Parçalar ile referans görüntü arasında görüntü farklılığının fazla olduğu problemlerde eşleştirme işleminde doğruluk derecesinin iyileştirilmesi için Zernike momentlerde n polinom derecesi arttırılmaktadır. Polinom derecesi 7 olarak alındığında parçalardaki ve referans görüntündeki her bir alt bloktan 16 elemanlı özellik vektörü elde edilmektedir. Özellik vektörlerinin eşleştirilmesi (2.19)'daki gibi yapılmaktadır.

$$Z = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (Z_i^{frag} - Z_i^{ref})^2} \quad (2.19)$$

Burada Z^{frag} parça görüntüsündeki, Z^{ref} referans görüntüdeki bir alt bloktan elde edilen Zernike moment değerlerini ifade etmektedir. Eşleşme sonucu olan Z değeri, elde edilen Zernike moment değerleri arasında öklid uzaklığı alınarak hesaplanır. En iyi eşleşme sonucunun bulunması için parçadaki bir alt blok, referans görüntüdeki tüm alt bloklar ile eşleştirilir. En küçük Z değerini veren referans görüntüdeki alt blok, en iyi eşleşme sonucunu veren alt blok olacaktır.

2.1.3. Global Tutarlılığın Sağlanması

Global tutarlılığın sağlanması için anahtar ve blok tabanlı yapılan eşleşmelerde hatalı tespit edilen sonuçlar elenmektedir. Hatalı eşleşme sonuçlarının elimine edilmesi için RANSAC [79] yöntemi kullanılmıştır.

RANSAC metodu, Fischler ve Bolles tarafından deneysel verilere bir model uydurmak için geliştirilmiş yinelemeli bir yöntemdir. Çok sayıda aykırı değer (outlier) içeren bir veri setindeki hataları minimize ederek kuvvetli ve başarılı bir model tahmin edilmeye çalışılır. RANSAC yöntemi, otomatik görüntü analizinde hataya eğimli özellik detektörlerinden sağlanan verileri, ideal bir şekilde yorumlamak için kullanışlıdır [79].

Çalışmada rastgele eşleşen belli sayıda anahtar noktalar seçilerek eşitlik (2.20)'de verilen H transformasyon matrisinin parametreleri hesaplanmaktadır.

$$H \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

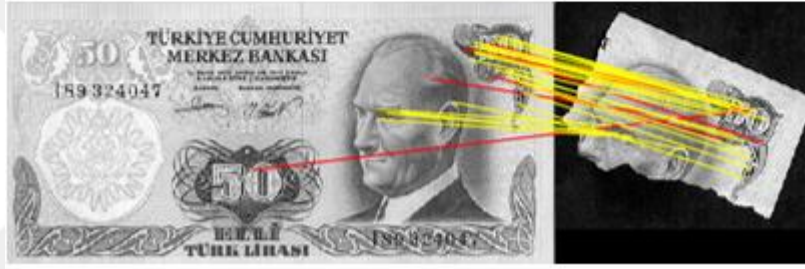
Transformasyon matrisi parametreleri ile eşleşen anahtar noktaları arasındaki Öklid uzaklık değeri hesaplanmaktadır. Önceden tanımlanan γ eşik değerine göre doğru eşleşmeler (inlier) ve hatalı eşleşmeler (outlier) belirlenmektedir. Çalışmada $\gamma=3$ olarak alınmıştır. RANSAC algoritmasının kullanımı ile hatalı eşleşmeler elenmekte ve böylece eşleştirme işleminde global tutarlılık sağlanmış olmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.13'te RANSAC algoritmasından faydalanarak bir parçanın referans görüntüler ile eşleştirilmesinde global tutarlılığın sağlanması gösterilmiştir.



(a)



(b)

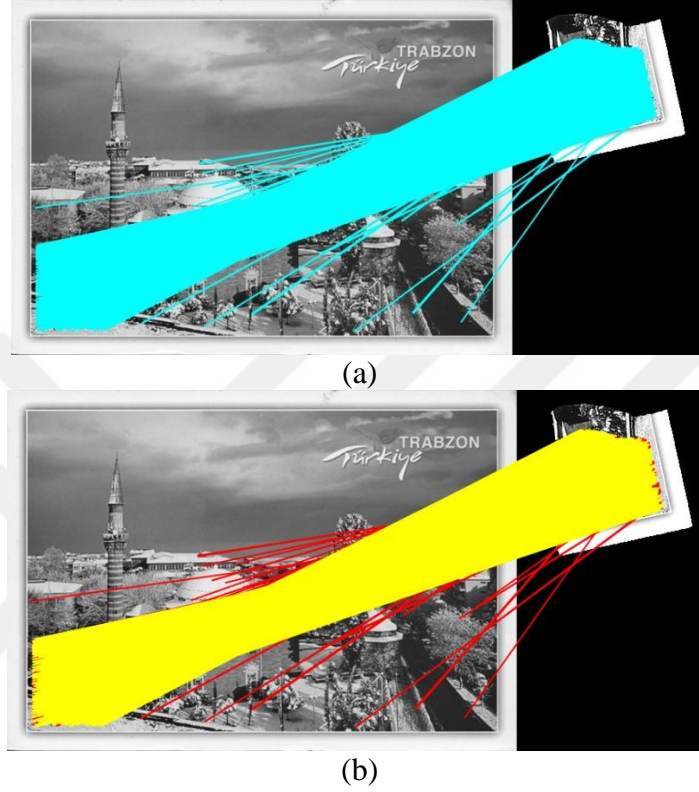


(c)

Şekil 2.13. (a) Bir banknot parçasının (a) arka (b) ön yüze ait referans görüntü ile AKAZE yöntemi kullanılarak eşleştirilmesi (c) RANSAC yöntemi hatalı eşleşen anahtar noktaların tespit edilmesi

Şekil 2.13'te çift taraflı yapboz problemlerinde global tutarlılığın sağlanması gösterilmiştir. Şekil 2.13.a'da parça ile referans banknotun arka yüzü arasında doğru eşleşen anahtar nokta tespit edilememiştir. Şekil 2.13.b'de ise parça ile referans banknotun ön yüzü arasında eşleşen anahtar noktalar tespit edilmiştir. Fakat eşleştirme işleminde global tutarlılığın sağlanması gerekmektedir. Şekil 2.13.c'de görüldüğü gibi RANSAC yöntemi ile doğru eşleşen anahtar noktalar tespit edilerek global tutarlılık başarılı bir şekilde sağlanmıştır. RANSAC yöntemi tarafından tespit edilen doğru eşleşen anahtar noktalar sarı, hatalı eşleşen anahtar noktalar kırmızı renkte gösterilmiştir.

Blok tabanlı yapılan eşleşmelerde RANSAC yönteminden faydalanılarak hatalı sonuçlar elenmektedir. Örnek olarak Şekil 2.14'te blok tabanlı eşleştirme yönteminde ile global tutarlılığın sağlanması gösterilmiştir.



Şekil 2.14. (a) Blok tabanlı yöntem kullanılarak bir kartpostal parçasının referans görüntü ile eşleştirilmesi (b) RANSAC yöntemi ile hatalı sonuçların elenmesi

Şekil 2.14.a'da blok tabanlı yaklaşımda Zernike moment yöntemi kullanılmıştır. Parçalar ve referans görüntüler 64x64 boyutlarında alt bloklara ayrılmıştır. Parçadaki alt bloklar ile referans görüntüdeki alt bloklar ile eşleştirilmiştir. Eşleşen alt blokların merkez noktaları Şekil 2.14.a'da gösterilmiştir. Eşleşen alt blokların merkez noktalarının konum bilgileri üzerinden RANSAC yöntemi ile global tutarlılık sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 2.14.b'de sarı çizgiler doğru eşleşen alt blokların merkez noktalarını, kırmızı çizgiler ise hatalı eşleşen alt blokları merkez noktalarını göstermektedir. Şekil 2.14.b'de gösterildiği gibi bir kartpostal parçasının referans görüntüde ait olduğu bölge başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

2.1.4. Çıkış Görüntülerinin Elde Edilmesi (Parçaların Bir Araya Getirilmesi)

Bu kısım üç aşamaya ayrılarak ele alınmıştır. İlk aşamada parçaların isabetli bir şekilde hizalanması gerçekleştirilmektedir. Diğer aşamada hizalanan parçalar nesnedeki ait oldukları konumlara göre boş çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilmektedir. Son aşamada ise çoklu yeniden oluşturma işleminde parçaların çerçeveye yerleştirilmesinde global tutarlılığın sağlanması ele alınmaktadır.

1. Parçaların hizalanması

Parçalar taratılma işleminde rotasyonlara maruz kalmaktadır. Çalışmada parçaların rotasyon açılarının tahmini için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem anahtar nokta tabanlı yeniden oluşturma süreçlerinde parçaların rotasyon açılarının tahminini gerçekleştirmektedir. Önerilen yöntem; iki aşamadan oluşmaktadır.

(a) Minimum kapalı çevrimin hesaplanması

Bu tezde minimum kapalı çevrimin hesaplanması için [119]'de geliştirilen alternatif bir yöntem kullanılmıştır. Söz konusu yöntemin aşamaları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Başlangıç noktaları olarak (a) en üstte, (b) en sağda, (c) en altta ve (d) en solda bulunan noktalar arasından en üst, sağ, alt ve sol noktalar belirlenir.

Adım 2: İlk olarak a ve b noktaları (en üst ve en sağdaki birinci nokta ile ikinci nokta) seçilir.

Adım 3: Bu iki noktayı birleştiren doğrunun eğimi belirlenir.

Adım 4: Bu doğrunun yatay ve dikey bileşenlerinin dışında kalan noktaların ilk nokta ile birleştirilmesinden oluşan doğrunun eğimi bulunur.

Adım 5: Bulunan bu eğimler arasında daha önceden belirlenen eğimden büyük olmak koşulu ile en büyük eğimi oluşturan nokta seçilir.

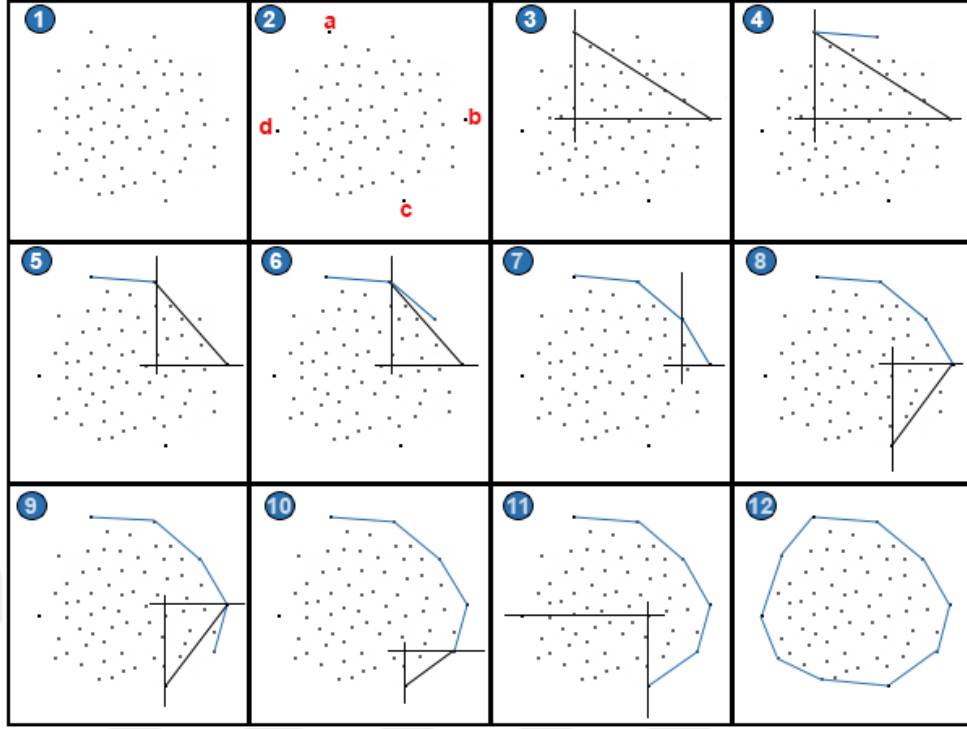
Adım 6: İlk nokta, kapalı çevrimin köşesi olarak belirlenir. Bundan sonra ilk noktanın yerini sonradan belirlenen nokta alır.

Adım 7: Eğer noktalar değiştirilmiş ise Adım 3'e geri dönlür. Aksi durumda Adım 1'de belirlenen b ve c noktaları seçilerek Adım 2'ye gidilir.

Adım 8: Sonra geriye kalan noktalar için (c ve d noktaları ardından d ve a noktaları) aynı işlemler tekrarlanır.

Adım 9: Kapalı çevrim elde edildiğinde algoritma durdurulur.

Şekil 2.15'te söz konusu algoritmanın işlem adımları verilmiştir.



Şekil 2.15. Minimum kapalı çevrimin hesaplanması

Örnek olarak Şekil 2.16’da referans banknot ile parça arasında doğru eşleşen anahtar noktaların minimum kapalı çevrimlerinin hesaplanması gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Referans banknot ile parça arasında doğru eşleşen anahtar noktalara minimum kapalı çevrimin uygulanması

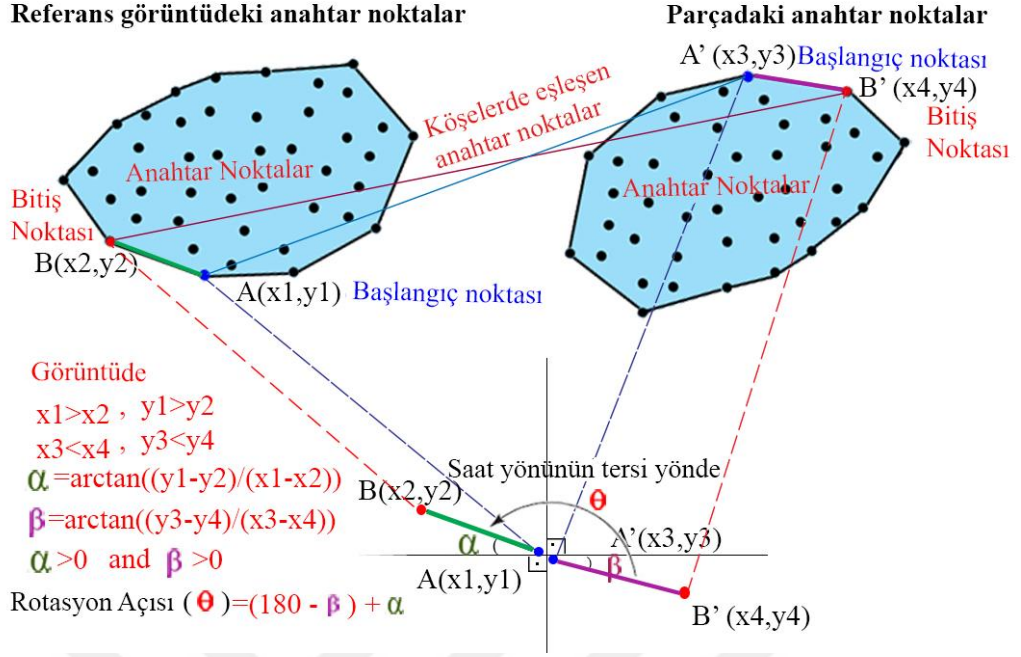
Şekil 2.16'da referans banknot ve parça görüntüsünde doğru eşleşen anahtar noktaların mimum kapalı çevrimleri tespit edilmiş ve kırmızı çizgilerle gösterilmiştir.

(b) Parçaların rotasyon açılarının hesaplanması

Bir parçanın döndürülmemiş halini referans görüntüdeki geometrik şekil, döndürülmüş halini ise parçadaki geometrik şekil temsil etmektedir. Bu geometrik şekiller birbirleriyle kıyaslanarak bir parçanın kaç derecelik açı ile döndürüldüğü tespit edilebilir.

Bir geometrik şekil, herhangi bir açı ile rotasyona uğratılırken merkezi etrafında ya da sabit tutulan bir köşesi üzerinde döndürülmektedir. Teorik olarak bir geometrik şekil, sabit tutulan bir köşesi üzerinde döndürüldüğünde bu köşenin koordinat düzlemindeki konumu değişmez. Fakat uygulamada bu geometrik şekil, bir imge olduğundan söz konusu köşenin imgedeki x ve y konum değerleri değişmektedir. Bir geometrik şekil, merkezi etrafında döndürüldüğünde ise geometrik şeklin bütün köşeleri aynı oranda konum değiştirmektedir. Bu durumlar dikkate alındığında bir parçanın rotasyon açı tahmini için referans görüntüdeki geometrik şeklin bir köşesindeki konum değişimi ve bu köşeye ait bir kenarın açı/eğim değişimi de bulunmalıdır.

Geometrik şekiller, doğru eşleşen anahtar noktalar kullanılarak oluşturulduğundan referans görüntüdeki bir köşe noktanın parçadaki hangi köşe nokta ile eşleştiği bilinmektedir. Bu nedenle referans görüntüdeki bir köşenin konum değişimi kolay bir şekilde bulunabilir. Köşe noktaların eşleştirilmiş olması, aynı zamanda geometrik şekillerdeki eşleşen kenarların da bilinmesi demektir. Bir köşeye ait bir kenarın açı/eğim değişimi hesaplanarak bir parçanın kaç derecelik açı ile döndürüldüğü tespit edilebilir. Bu işlem; koordinat düzleminde bir doğrunun saat yönünde veya tersi yönde 0° ile 360° arasında bir açı ile hareket ettirilmesine benzetilebilir. Bir parçanın rotasyon açısının hesaplanması Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Bir parçanın minimum kapalı çevrim üzerinden rotasyon açısının hesaplanması

Şekil 2.17'deki rotasyon açısı hesabı, adımlar halinde aşağıda açıklanmıştır.

Adım 1: Başlangıç noktası belirlenir. Bunun için referans görüntüde bulunan geometrik şeklin herhangi bir kenarı seçilir. Seçilen bu kenarın başlangıç ve bitiş noktaları belirlenir. Başlangıç noktası, geometrik şekildeki bu kenarı oluşturan iki köşe noktadan herhangi birisi olarak seçilebilir. Fakat seçilen başlangıç noktasının eşleştiği köşe nokta, parçadaki kenar için başlangıç noktası olarak belirlenmelidir. Çünkü parçadaki bu başlangıç noktası; geometrik şekil, rotasyona uğratılacağında üzerinde döndürüleceği köşe noktayı temsil etmektedir.

Adım 2: Birbirleriyle eşleşmiş kenarlar, başlangıç noktalarına göre düzleme taşınır. Kenarların başlangıç noktaları, düzlemde her zaman göreceli olarak bitiştirilmektedir. Böylece parçadaki kenarın, banknottaki kenar durumuna gelmesi için hangi yönde kaç derecelik açı ile döndürülmesi gerektiği belirlenebilir. Düzlemde başlangıç ve bitiş noktalarının x ve y koordinatları, bu noktaların imgedeki x ve y konumlarıdır. Şekil 2.17'de A başlangıç noktasının x ve y konum değerleri, B bitiş noktasından daha büyüktür. Bununla birlikte bir kenarın başlangıç veya bitiş noktalarının konum değerleri diğer bir kenarın başlangıç ve bitiş noktalarının konum değerleri ile kıyaslanmaz. Yani A noktası, A'

veya B' noktası ile kıyaslanamaz. Çünkü bu kenarların başlangıç noktaları düzlemde göreceli olarak bitleştirilmiştir.

Adım 3: Düzlemde bitleştirilen kenarların açı/eğim değerleri hesaplanır. ması: İmgedeki konumlarına göre kenarların açı/eğim değerleri (2.21)'deki gibi hesaplanır.

$$\alpha = \left(\frac{y1 - y2}{x1 - x2} \right) , \beta = \left(\frac{y3 - y4}{x3 - x4} \right) \quad (2.21)$$

Adım 4: Bir köşeye göre bir parçanın rotasyon açısı tahmini yapılır. Hesaplanan açı/eğim değerlerine göre parçaya ait kenarın, referans görüntüye ait kenar konumuna gelebilmesi için kaç derecelik açı ile döndürülmesi gerektiği hesaplanır. Hesaplanan bu değer bir parçanın rotasyona uğradığı açı değeridir. Şekil 2.17'de göre parçanın rotasyon açısı(θ) = $(280 - \alpha) + \beta$ eşitliği üzerinden hesaplanır.

Referans banknottaki geometrik şekle ait kenar, düzlemde 4 farklı bölgede bulunabilir. Aynı şekilde parçadaki geometrik şekle ait kenar, düzlemde 4 farklı bölgede olabilir (Şekil 2.17). Dolayısıyla rotasyon açısı hesabında $4 \times 4 = 16$ farklı durum söz konusudur. Bununla birlikte rotasyona uğramış bir parçanın düzgün hizalanması için saat yönünde mi yoksa tersi yönde mi döndürüleceğine karar verilmeli. Bu durum da göz önüne alındığında 16 farklı duruma, parçanın dönüş yönleri de dahil edilmelidir. Şekil 2.17'de $\alpha > \beta$ olduğu farz edilirse rotasyonun daha az maliyetli olması için parçanın saat yönünün tersi yönde döndürülmesi gerektiği kolayca tespit edilebilmektedir.

Kullanılan anahtar tabanlı yöntemlerin başarısı, geometrik şekillerin oluşturulmasını birebir etkilemektedir. Genellikle referans görüntü ve parçada oluşturulan geometrik şekiller birebir aynı olmamaktadır. Yani eşleşen bazı kenarların doğrultusu ve uzunlukları farklı olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında referans görüntüdeki geometrik şeklin bir kenarı temel alınarak yapılan rotasyon açısı tahmini her zaman isabetli olmayabilir. Hatta esas alınan bu kenar, parçadaki kenar ile birebir aynı uzunlukta olsa bile rotasyon açısı tahmini doğru çıkmayabilir.

Bu nedenle çalışmada anahtar tabanlı yöntemlerin bu yönde oluşturabileceği olumsuz etkiyi azaltmak için rotasyon açısı hesabı, tüm köşeler için yapılmaktadır. Çıkan sonuçlar arasından birbirine yakın olan açı değerlerinin ortalaması alınır. Böylece daha isabetli bir şekilde rotasyon açısı tahmini yapılmış olur. Bir parçanın rotasyon açısını hesaplamak için söz konusu algoritmanın kaba kodu aşağıda verilmiştir.

Algoritma 1. Minimum kapalı çevrim üzerinden bir parçanın rotasyon açısı tahmini

Giriş: $mAngle = \text{median}(\text{Sort}(\theta_i))$ // θ_i : i . kenarın tahmin edilen yönelim açısı

$sumAngle = 0$ // Açı toplamı

$angleDev = 1;$

k=0

for i=1→n // n : kenar sayısı

if $= |\theta_i - mAngle| \leq angleDev$

$sumAngle = sumAngle + \theta_i$

$k = k + 1$

end if

end for

$rotationAngle = sumAngle / k$

Çıkış : Rotasyon açısı değeri ($rotationAngle$)

Önerilen rotasyon açısı tahmin yönteminin uygulanması örnek olarak Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Minimum çevrimlerin uygulanması sonucu oluşan geometrik şekillerin birbirleri ile karşılaştırılması

Şekil 2.18’de minimum kapalı çevrimler kırmızı, kapalı çevrimlerdeki eşleşen köşe noktalar ise mavi renkte çizgiler ile gösterilmiştir. Doğru eşleşen anahtar noktalar ise sarı çizgiler ile gösterilmiştir. Şekil 2.18’deki banknot parçasının rotasyon açısı saat yönünde 15.160 derece olarak hesaplanmıştır. Bu parça saat yönünün tersi yönde döndürülerek hizalanmıştır.

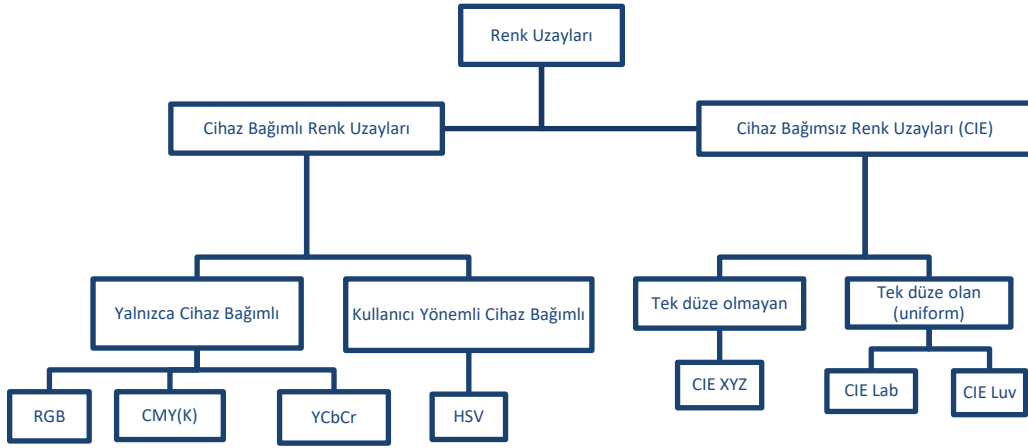
2. Parçaların boş bir çerçeveye yerleştirilmesi

Düzgün hizalanan parçalar, boş bir çerçeveye yerleştirilirken parçanın konum bilgisi hesaplanır. Parçaların çerçeveye yerleştireceği konum, referans görüntü ile hizalanmış parça arasında doğru eşleşen anahtar noktaların/blokların merkez noktası hesaplanarak belirlenir. Parçada hesaplanan merkez nokta, referans görüntüdeki merkez nokta konuma gelebilmesi için ne kadar ötelenmesi gerektiği bulunur. Daha sonra parçaya ait tüm pikseller, aynı ötelemeye tabii tutularak çerçeveye kopyalanır. Böylece bir parça, çerçeveye yerleştirmiş olur.

Parçaların yerleştirilme sürecinde alt problemler ile karşılaşılmaktadır. Söz konusu alt problemlerin çözümlerine yönelik bu çalışmada yaklaşımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımlar; parçalara ait piksellerin belirlenmesi ve yerleştirme sürecinin tamamlanması ve çoklu yeniden oluşturma süreçlerinde global tutarlılığın sağlanması şeklinde üç başlık halinde aşağıda açıklanmıştır.

(a) Parçalara ait piksellerin belirlenmesi

Bu tez kapsamında geliştirilen yaklaşımda parçaya ait pikseller belirlenmesinde parça görüntülerinde kullanılan arkaplan renklerinden faydalanılmaktadır. Parçalara ait görüntülerin ikiye bölütlenmesinde ilk etapta literatürde yaygın kullanılan RGB, CMYK, YCbCr, HSV ve CIELab renk uzayları ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Tarayıcılardan kaynaklanan renk problemlerini göz önünde bulundurarak söz konusu renk modellerinin cihaz bağımlılık durumları incelenmiştir. Şekil 2.19’da renk modellerinin cihaz bağımlılıklarına göre sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.19. Renk uzaylarının cihaz bağımlılıklarına göre sınıflandırılması [81].

Şekil 2.19’da verilen kavramlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Cihaz bağımlı renk modelleri: Cihazın sinyallerinden etkilenmekte ve görüntüleme kullanılan araçlara göre renkler üretilmektedir. Bu renk modelleri, rengin tutarlı olmasını gerektiren birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır. Örneğin TV ve video sistemi gibi insan görme algısı üzerinde etkisi olan donanım aygıtlarında kullanılmaktadır [81, 99].

2. Kullanıcı yönelim cihaz bağımlı renk modelleri: İnsanların rengi tanımlaması ve ayırt etmesini sağlayan renkler üretilir [81,99].

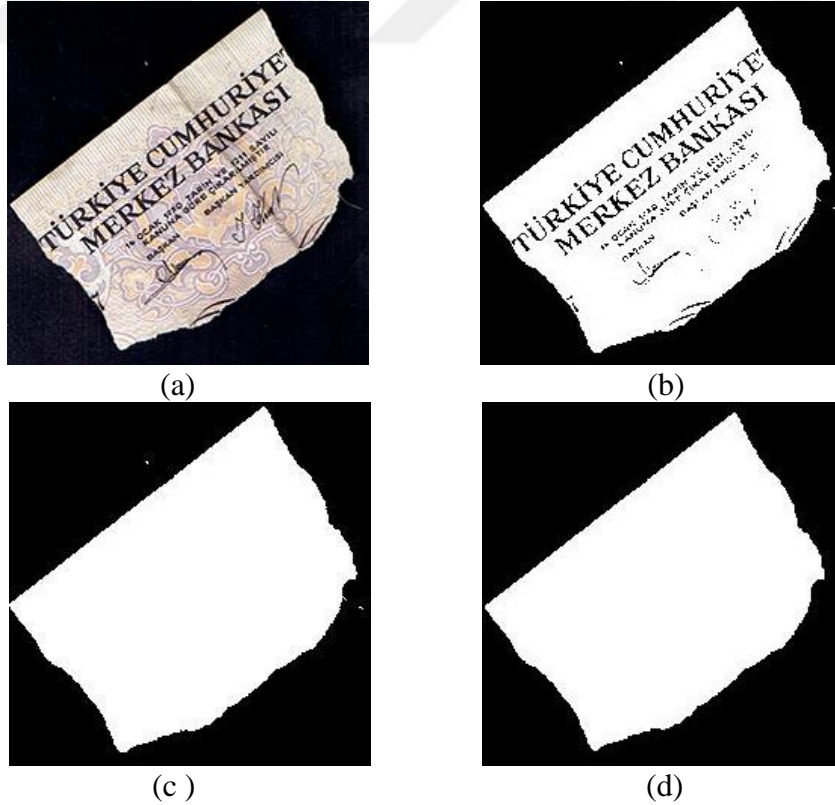
3. Cihazdan bağımsız renk uzayları: Cihazın performans göstermesi için ayarlanan parametre değerlerinden ve kullanılan aygıtın özelliklerinden etkilenmeden aynı renk bilgilerinin üretilmesini sağlamaktadır. Bu tip renk modelleri kullanılarak ağda farklı donanım aygıtları arasında görüntü bilgilerinin iletilmesi sağlanmaktadır [81, 99].

Çalışmada parçalara ait piksellerin belirlenmesinde cihazdan bağımsız olması sebebiyle CIE Lab renk uzayının kullanılmasını tercih edilmiştir. Ayrıca CIE Lab renk uzayı parça görüntülerinin arkaplanlarını saptamada kullanışlı bir yapıdadır.

CIE Lab renk uzayında L eksenini parlaklığı göstermekte ve 0 ile 100 arasında değer almaktadır. a eksenini pozitif ve negatif değer almaktadır. Pozitif değerler kırmızıya yakınlığı negatif değerler yeşil renge yakınlığı ifade etmektedir. Benzer şekilde b ekseninde negatif değerler maviye, pozitif değerler ise sarı renge yakınlığı göstermektedir. Dolayısıyla CIE Lab renk uzayı, bir parça parça görüntüsünde arkaplanda renkleri (siyah ve yeşil) saptamak için kullanışlı bir yapıya sahiptir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşımda parça görüntüsü ilk etapta CIELab renk modeline dönüştürülmektedir. Yeşil arkaplan kullanılan parçalarda arkaplanı ait piksellerin a bileşeni belirli bir negatif değer aralığında olacaktır. Siyah arkaplan kullanılan parçalarda arkaplanı ait piksellerin L bileşeni değeri sıfıra daha yakın aralıklarda olacaktır. Önerilen yaklaşımda parça görüntüleri belirlenen eşik değerlerine göre ikili seviyeye dönüştürülmektedir. Parçaların yüzeylerinde arkaplanlara yakın veya aynı renkte piksellerin olabilmektedir. Bu durumda ikili seviyeye dönüştürülen görüntülerde boşluklar (delikler) oluşacaktır. Söz konusu alt problemlerin aşılması için ikili seviyeye dönüştürülmüş görüntüye rekonstrüksiyon tabanlı boşluk doldurma yöntemi [120] uygulanmaktadır. Ayrıca parçaların taratılma sürecinde oluşan gürültüden dolayı parçaya ait pikseller hatalı bir şekilde tespit edilebilir. Bu nedenle ikili seviyeye dönüştürülmüş görüntüye 3x3 lük aşınma operatörü [113] uygulanarak söz konusu gürültü pikseller ortadan kaldırılmaktadır.

Örnek olarak önerilen yaklaşım ile siyah arkaplan kullanılan bir parça görüntüsünde parçaya ait piksellerin belirlenmesi Şekil 2.20’de gösterilmiştir.

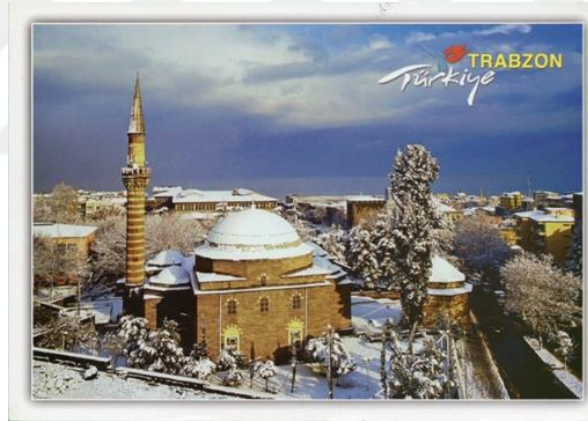


Şekil 2.20. (a) Parça görüntüsü (b) CIELab renk modeli yardımıyla parça görüntüsünün ikili seviye dönüştürülmesi (c) boşlukların doldurulması (d) gürültülerin giderilmesi

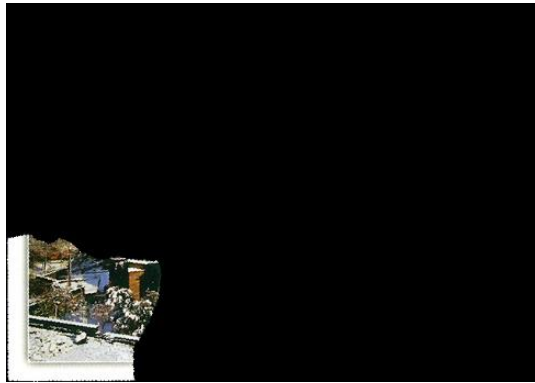
Şekil 2.20.a'da görüldüğü gibi bir banknot parçasının yüzeylerinde arkaplanlara yakın veya aynı renkte pikseller vardır. Ayrıca parçaya ait görüntü gürültü bir yapıdadır. Bu parça görüntüsü ilk etapta CIELab renk uzayına dönüştürülmüştür. Daha sonra bu görüntüde L bileşen değeri 30 ve altında olan pikseller 0, diğerleri 1 yapılarak Şekil 2.20.b'de görüldüğü gibi ikili seviyeye dönüştürülmüştür. Parça görüntüsünde oluşan boşluklar Şekil 2.20.c'de görüldüğü gibi rekonstrüksiyon tabanlı boşluk doldurma yöntemi [120] ile doldurulmuştur. En son aşamada ise parça görüntüsündeki gürültülü pikseller, 3x3 lük aşınma operatörü ile ortadan kaldırılmıştır. Şekil 2.20.d'de görüldüğü gibi parçaya ait pikseller önerilen yaklaşım ile başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

(b) Yerleştirme sürecinin tamamlanması

Tek taraflı yapboz problemlerinde düzgün hizalanan parçalar boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilmektedir. Örnek olarak Şekil 2.21'de bir kartpostal parçasının ait olduğu konuma göre boş bir çerçeveye yerleştirilmesi gösterilmiştir.



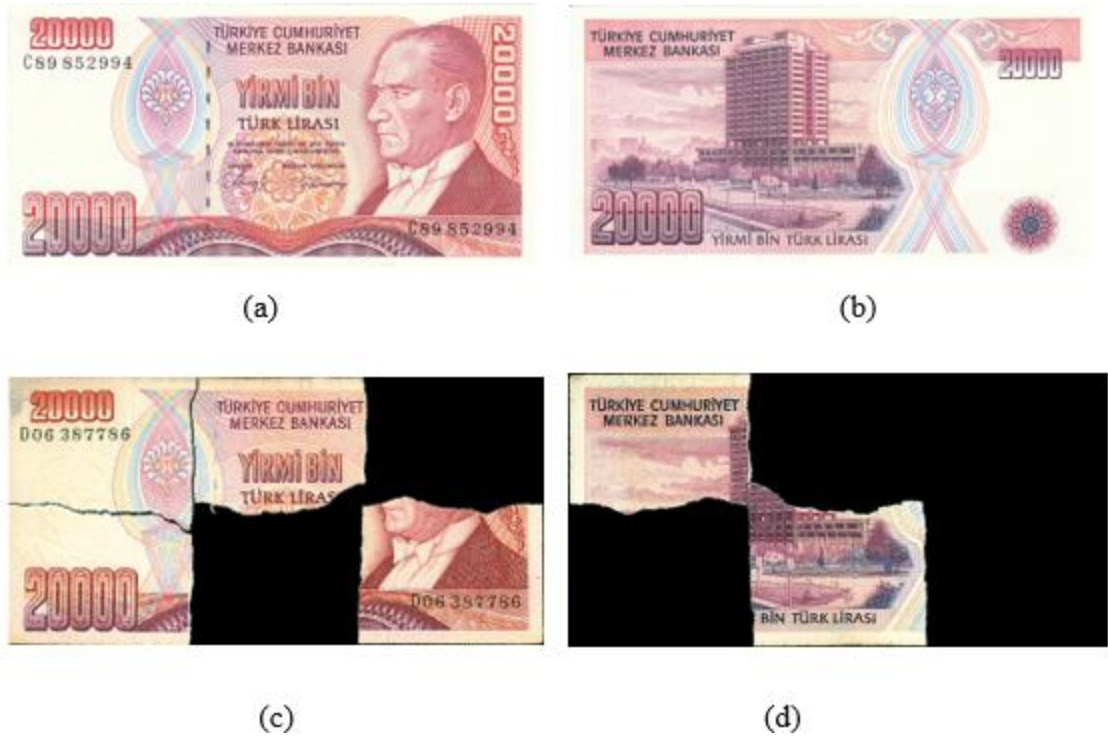
(a)



(b)

Şekil 2.21. (a) Referans görüntü (b) bir parçanın boş bir çerçeveye yerleştirilmesi

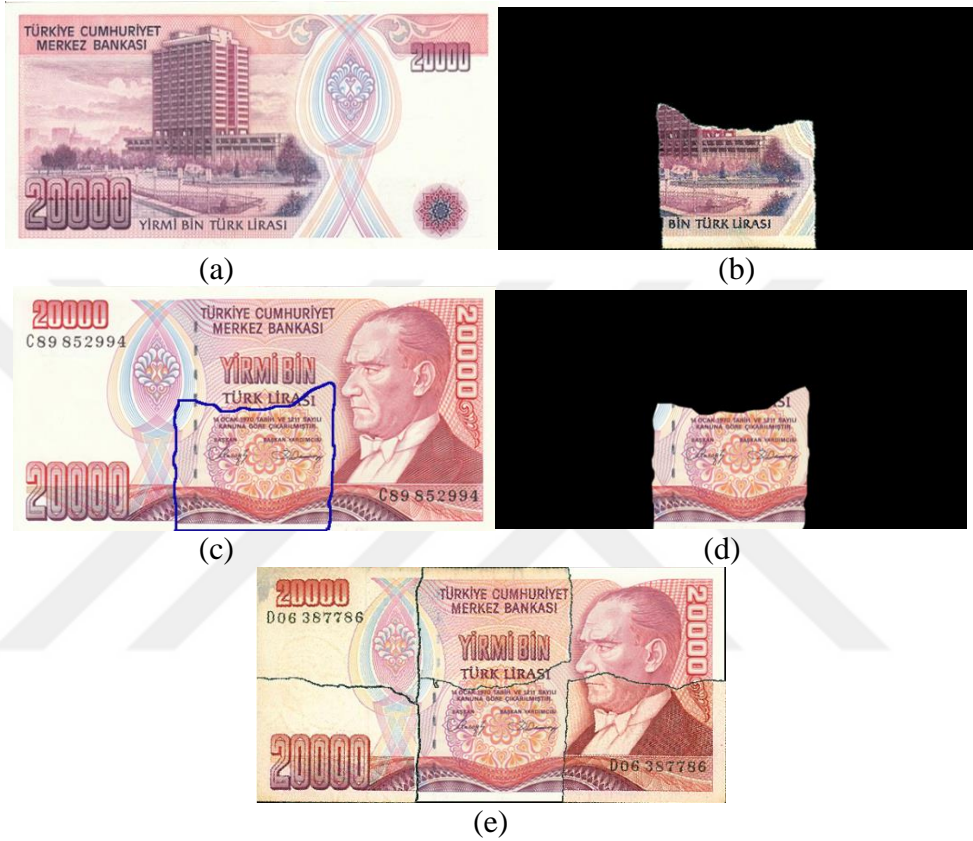
Şekil 2.21.a'da referans görüntü verilmiştir. Şekil 2.21.b'de ise düzgün hizalanan parçanın kartpostalda ait olduğu konuma göre yerleştirilmesi verilmiştir. Benzer şekilde kartpostala ait diğer parçalar ait oldukları konuma göre yerleştirilerek problem çözülmektedir. Fakat parçalanmış banknotlar gibi çift taraflı yapboz problemlerinde yeniden oluşturma sürecinin tamamlanmasında bazı parçaların ters çevrilmesi gerekebilmektedir. Örnek olarak Şekil 2.22'de bir banknota ait parçaların boş çerçevelere yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Parçalanmış bir banknotun (a) ön (b) arka yüzüne ait referans görüntü (c) ön yüzü (d) arka yüzü taratılan parçaların çerçeveye yerleştirilmesi

Şekil 2.22.a ve b'de parçalanmış banknotun ön ve arka yüzüne ait referans görüntüleri verilmiştir. Parçalar referans görüntüleri ile eşleştirilerek ilgilik oldukları yüze göre Şekil 2.22.b ve c'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Yeniden oluşturma sürecinin tamamlanabilmesi için ön ve arka yüz çerçeveye yerleştirilen parçalar, boş bir çerçevede banknotun bir yüzüne göre yeniden bir araya getirilmesi gerekir. Bu nedenle söz konusu parçaların ters çevrilerek tekrar taratılması ve ilgili referans görüntü ile yeniden eşleştirilmesi gerekir. Yarı otomatik olarak yapılacak işlemler fazla zaman almakta ve ek işlem yükü gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmada tam otomatik yeniden oluşturma

stratejisi önerilmiştir. İşlem sırasında maliyetin düşürülmesi için ön ve arka yüz çerçeveye yerleştirilen parça sayılarına bakılmaktadır. Hangi çerçevede parça sayısı daha az ise o çerçevedeki parçalar, ters çevrilmektedir. Örnek olarak Şekil 2.23'te bir parçanın otomatik ters çevrilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.23. (a) Arka yüze ait referans görüntü (b) bir parçanın ilgili konuma göre arka yüz çerçeveye yerleştirilmesi (c) ön yüz referans görüntüde bir parçanın ait olabileceği konum (d) parçanın ön yüz çerçeveye yerleştirilmesi (e) tüm parçaların çerçeveye yerleştirilmesi

Şekil 2.23'te arka çerçeveye yerleştirilen parça ters çevrildiğinde referans alınan banknotun ön yüzünde mavi çizgilerle gösterilen bölgeye denk gelecektir (Şekil 2.23.c). Bu bölge parçanın ön yüz görüntüsünü verecektir. Aynı zamanda bu parçanın diğer çerçevede yerleştirileceği konumu da göstermektedir. Ters çevrilen parçanın diğer çerçevedeki yerleştirileceği konum, ters çevrilmeden önceki yerleştirildiği konumunun yatay eksene göre simetriği alınarak kolay bir şekilde bulunabilmektedir. Şekil 2.23.d'de ters çevrilerek ön yüz çerçeveye yerleştirilen parça sentetik bir parçadır. Yani parçanın ön

yüzü, referans banknotun ön yüzündeki piksellerden kopyalanarak oluşturulmuştur. Şekil 2.23.e’de yapboz probleminin çözümü gösterilmiştir. Bilgisayar destekli bu çözüm sonucuna bakarak adli bilim insanları parçalanmış banknotları isabetli bir şekilde yeniden oluşturulabilecektir.

Bu tez kapsamında önerilen global tutarlılık yaklaşımlarından biri çift taraflı yapboz probleminin çözümüne yöneliktir. Genellikle parçaların hangi yüzünün taratıldığı yapılan eşleştirme sonuçlarında belli olmaktadır. Fakat küçük boyutlu parçalara rastlandığında ön ve arka yüz ile yapılan eşleşmelerde doğru eşleşen anahtar nokta sayıları arasındaki fark az olabilir. Bu durumda parçanın hangi yüze ait olduğunu netleştirilmek için ekstra kontroller yapmak gerekebilir. Bu amaçla çalışmada önerilen kontrol mekanizmasının detayları aşağıda verilmiştir.

İlk önce parçanın ön ve arka yüze ait referans görüntüler ile ilişki oranlarına bakılmaktadır. İlişki oranları, (2.22)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$FR = \frac{F_s}{F_s + R_s} \times 100, \quad RR = \frac{R_s}{F_s + R_s} \times 100 \quad (2.22)$$

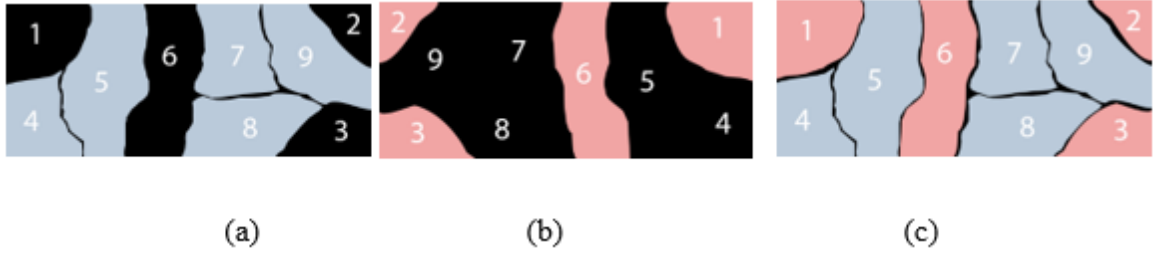
Eşitlik (2.22)’de F_s ön yüzde, R_s ise arka yüzde doğru eşleşen anahtar nokta sayılarını göstermektedir. FR ise parçanın ön yüzle, RR ise arka yüzle olan ilişki yüzdelerini ifade etmektedir.

Örneğin bir parça; ön referans görüntü ile eşleştirildiğinde 45, arka yüz referans görüntü ile eşleştirildiğinde 5 adet doğru eşleşen anahtar nokta tespit edilsin. Parçanın referans banknotun ön (FR) ve arka yüzü (RR) ile olan ilişki oranları aşağıda verilmiştir.

$$FR = \frac{45}{(45 + 5)} \times 100 = \%90 \text{ ve } RR = 100 - FR = 10\% \text{ olarak bulunacaktır.}$$

Bu çalışmada bir yüzle olan benzerlik yüzdesi %80’nin üstünde parçalar; Doğru Pozitif (True Positive) TP olarak etiketlenmektedir. Yani parçanın hangi yüze ait olduğu net bir şekilde belirlenmiştir. Benzerlik yüzdesi %80’nin altında olan parçalar ise Yanlış pozitif (False Positive) FP olarak etiketlenmektedir.

Parçaların hangi yüze ait olduğunun tespitinde hata ile karşılaşılmadığında bir çerçeveye yerleştirilen parçanın diğer çerçevede karşılık geldiği bölgeler boş kalacaktır. Örnek olarak TP olarak etiketlenmiş 9 parçanın çerçevelere yerleştirilmesi gerçekleştirmek istensin. Yerleştirme işlemi, Şekil 2.24’te verilmiştir.



Şekil 2.24. (a) Ön yüz çerçeveye yerleştirilmiş parçalar (b) arka yüz çerçeveye yerleştirilmiş parçalar (c) ön yüze göre parçaların yeniden bir araya getirilmesi

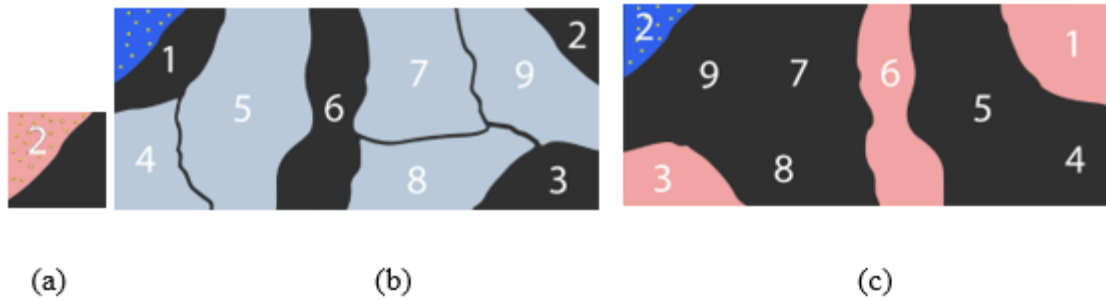
Şekil 2.24'te ön yüze ait parçalar açık mavi, arka yüze ait olanlar açık kırmızı renkte ve karşılık gelen boş kısımlar siyah renk ile gösterilmiştir. Parça sayısı daha az olduğu için arka yüze ait olan parçalar ters çevrilerak Şekil 2.24.c'deki gibi yeniden oluşturma süreci tamamlanmıştır. Tüm parçalar TP etiketine sahip olduğu için yerleştirme işleminde herhangi bir problem yaşanmayacaktır. Fakat FP olarak etiketlenmiş herhangi bir parçaya rastlandığında parçanın hangi yüze ait olduğu net bir şekilde belirlenemediğinden çerçevelerde karşılık gelen bölgeler boş kalmayabilir. Bu durumda parçalar, bir yüze göre yeniden bir araya getirilirken yerleştirme işleminde çakışmalar olabilir. Yani bazı parçalar hatalı olarak üst üste yerleştirilebilir.

Aşağıda muhtemel hata senaryoları oluşturulmuş ve bu hata senaryolarına karşı çözüm önerileri verilmiştir.

Senaryo 1: Banknota ait eksik parça bulunmamaktadır.

İlk etapta tüm TP etiketine sahip parçalar ilgili çerçevelere yerleştirilir. Daha sonra FP etiketine sahip parçaların hangi çerçeveye yerleştirileceği netleştirilir.

Örnek olarak Şekil 2.25'te 2 nolu parça FP, diğer parçalar ise TP olarak etiketlenmiş olsun.



Şekil 2.25. (a) 2 nolu parça (b) ön (c) arka çerçeveye yerleştirilen parçalar

Şekil 2.25'te ön yüze ait olan parçalar açık mavi, arka yüze ait olanlar açık kırmızı ve 2 nolu parçanın doğru eşleşen anahtar noktaların konumları sarı renklerle gösterilmiştir. Eşleştirme işlemi sonucunda 2 nolu parçanın ön ve arka çerçevede koyu mavi bölgelere (parça yerleştirilmemiş) yerleştirilme durumu ortaya çıkmıştır. Bu belirsizliği gidermek için ilk etapta bir çerçevedeki koyu mavi bölgenin yatay eksene göre simetriğine alınarak diğer çerçevede karşılık gelen bölge tespit edilir. Karşılık gelen bölgelerin boş olup olmadığının kontrolü, doğru eşleşen anahtar noktalar üzerinden kolay bir şekilde tespit edilebilir. Söz konusu kontrol işlemi aşağıda açıklanmıştır.

Referans görüntüde doğru eşleşen anahtar noktaların çerçevedeki konumları K matrisi ve bu noktaların yatay eksene (w) göre simetriği K' matrisi şeklinde (2.23)'teki gibi ifade edilsin.

$$K = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \Rightarrow K' = \begin{bmatrix} w-x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ w-x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Karşılık düşen bölgenin boş olup olmadığının tespiti (2.24)'e göre yapılmaktadır.

$$CR = \begin{cases} \text{Eğer } \sum_i^n P(K'_i) = 0 \text{ ise karşılık gelen bölge boş} \\ \text{Eğer } \sum_i^n P(K'_i) \neq 0 \text{ ise karşılık gelen bölge dolu} \end{cases} \quad (2.24)$$

Burada karşılık düşen bölgedeki piksellerin renk değerlerinin toplamı 0 ise o bölge (CR) boştur. Eğer piksel değerlerinin toplamı 0'dan farklı ise karşılık düşen bölge doludur. Yani o bölgeye başka bir parça yerleştirildiği için karşılık düşen bölgedeki piksellerin renk değerlerinin toplamı 0'dan farklı çıkacaktır.

Şekil 2.25 'te 2 nolu parça ön çerçeveye yerleştirildiği takdirde hata olacaktır. Çünkü arka çerçevede karşılık gelen bölge (CR) değeri 0'dan farklıdır. Yani Şekil 2.25.c'de görüldüğü gibi 1 nolu parça yerleştirilmiştir. Dolayısıyla parçalar bir yüze göre yeniden bir araya getirileceği zaman 1 ve 2 nolu parçalar üst üste gelecektir. Arka çerçevede ise 2 nolu parçanın karşılık düşen bölgesi (CR) boştur. Bu nedenle 2 nolu parçanın arka yüz

çerçeveye yerleştirilmesi isabetli olacaktır. Dolayısıyla söz konusu bu parçanın arka yüzünün taratıldığı anlaşılmaktadır.

Senaryo 2: Banknota ait eksik parçalar var ve bu nedenle çerçevelerde karşılık gelen bölgeler boştur.

Örneğin Şekil 2.25.c'de 1 nolu parçanın eksik olduğu farz edilirse senaryo 1'deki çözüm önerisi geçersiz olacaktır. Yani FP etiketine sahip 2 nolu parçanın ön ve arka çerçevede yerleştirileceğini kısımların karşılık geldiği bölgeler boş olacaktır. Bu durumda FP etiketine sahip parçaların banknotun hangi yüzüne ait olduğunun belirlenmesi için ekstra bir karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Karşılaştırma işlemi, parçanın çerçevede yerleştirileceği kısmın referans görüntüde denk geldiği yerdeki piksel değerleri ile parçanın piksel değerleri arasında benzerliğe bakılarak yapılmaktadır.

Örneğin Şekil 2.25'te 2 nolu parçanın çerçevede yerleştirilmeyi talep ettiği bölge bilinmektedir. Yani yerleştirilme işlemi gerçekleştirilecek olsa parçaya ait her bir piksel belirlenen bölgeye kopyalanacaktır. Dolayısıyla parçanın piksel değerlerinin kopyalanacağı konumlar alınarak referans görüntüde karşılık gelen bölge bulunmuş olur. Daha sonra parça ile referans bölgede karşılık gelen bölge arasında görüntü farkına bakılır. Görüntü farklılığı hangi yüzde daha az ise parça o yüze aittir.

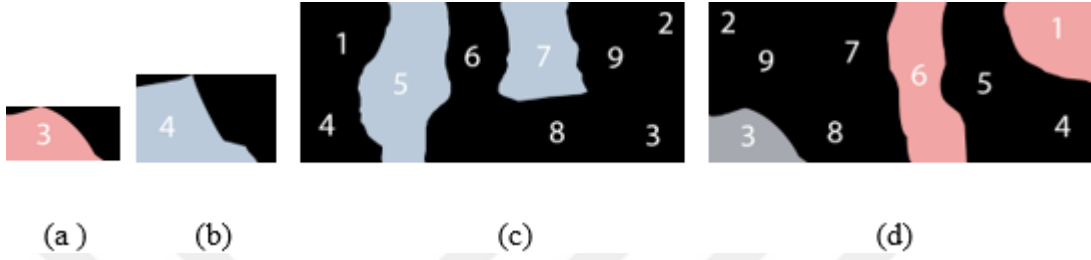
Bu çalışmada parça ile referans görüntüde ilişkili bölgenin eşleştirilmesi için kare farklarının toplamı olan SSD (Sum of Square Diffrence) [121,122] benzerlik ölçütünden faydalanılmıştır. Görüntüler arasındaki fark eşitlik (2.25)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$R(\psi_r, \psi_f) = \sqrt{\sum_{i=0}^{H-1} \sum_{j=0}^{W-1} [(I_{RGB}^R(i+u, j+v) - I_{RGB}^F(i, j))^2]} \quad (2.25)$$

Burada ψ_r , referans görüntüde karşılık gelen bölgeyi, ψ_f ise parçaya ait görüntüyü temsil etmektedir. I_{RGB}^R ve I_{RGB}^F sırasıyla referans görüntüde ve fragmandaki renk değerlerini (Red, Green and Blue) ifade etmektedir. Bu formülde her bir renk kanalındaki (RGB) değerler birbirinden ayrı ayrı çıkartılmaktadır. H ve W parçanın dikey ve yatay boyutudur. Parça çerçeveye kopyalanırken yapılan y konumuna göre öteleme miktarı u , x konumuna göre ise v ile gösterilmiştir.

Parça, referans görüntüde karşılık gelen bölge eşleştirildiğinde (2.25)'teki formül üzerinden hesaplanan görüntü farklılığı hangi tarafta daha az ise parça o yüze aittir.

Senaryo 3: Banknota ait eksik parçalar var ve çerçevelerde karşılık gelen bölgeler boş ve bazı parçaların çerçeveye yerleştirilmesinde çakışmalar var. Bu durum Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. (a) 3 nolu parça, (b) 4 nolu parça (c) ön (d) arka çerçevedeki son durum

Şekil 2.26'da 3 nolu parça gerçekte arka yüze, 4 nolu parça ise ön yüze aittir. Fakat her iki parçada banknotun arka yüzüne yerleştirilmeyi talep etmişlerdir. Normalde parçaların gerçekte hangi yüze ait olduğunun tespiti için diğer yüzlerine bakılması gerekir. Fakat (2.25)'teki gibi görüntü farklılığı hesabı yapılarak parçanın hangi yüze ait olduğu bulunabilir. Çünkü parçaya ait her piksel, referans görüntüde karşılık gelen kısımdaki piksellerle karşılaştırıldığı için doğruluk oranı yüksek olacaktır.

(c) Çoklu yeniden oluşturma işlemlerinde global tutarlılığın sağlanması

Literatürde daha önce orijinal hali bilinmeyen nesnelerin yeniden oluşturulması için geliştirilen yaklaşımlarda parçaların kenarları ve kenarlarındaki renk bilgilerinden faydalanılmıştır [31, 37]. Bu çalışmada benzer yaklaşım benimsenerek aynı görüntü özelliğine sahip parçalanmış birden fazla nesnenin çoklu olarak yeniden oluşturulması ele alınmıştır.

Problem çözümünün ana aşamaları aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Tüm parçaların çerçeveye yerleştirilecek konumları (öteleme miktarı) belirlenir.

Adım 2: Parçalara ait pikseller belirlenir ve parçaların sınırları çıkarılır.

Adım 3: Parçaların sınır karmaşıklıkları Douglas Peucker algoritması ile azaltılır ve parça kenarlarında kritik noktalar tespit edilir.

Adım 4: Parçaların yerleştirilmesine rastgele seçilen bir parçadan başlanır ve seçilen parça boş bir çerçeveye yerleştirilir.

Adım 5: Yerleştirilen parçaya konumsal yakınlığı olan parçalar belirlenir. Yerleştirilen parça ile aday komşu parça arasında ilk etapta çakışma durumlarına bakılır. Yerleştirilen parça ile çakışan aday komşu parçalar farklı nesnelere ait olarak belirlenir ve söz konusu parçaların yerleştirilmesi sonraki aşamalara bırakılır.

Adım 6: Çakışma durumu olmayan her bir aday parça çerçeveye yerleştirilen parça ile eşleştirilir. Eşleştirme işlemi, parça kenarlarındaki kritik noktalar üzerinden yapılır. Yerleştirilen parçanın kritik noktalarına konumsal yakınlığı olan aday komşu parçadaki kritik noktalar tespit edilir. Konumsal yakınlığı olan kritik noktalar çiftinin renk benzerliklerine bakılır. Renk benzerliliğinin tespit edilmesi için kritik noktaların RGB değerlerinin kareler farklarının toplamı (SSD) toplamı alınır. Kareler farklarının toplamı belirli bir eşik değerinin altında olan kritik noktalar isabetli eşleşen kritik noktalar olarak belirlenir. Benzer şekilde yerleştirilen parça ile diğer aday komşu parçalar, kritik noktalar üzerinden eşleştirilir. Yerleştirilen parça ile en fazla eşleşen kritik nokta sayısına sahip parça belirlenir. Bu parça global tutarlılığı sağlayan parça olarak belirlenir.

Adım 7: Yerleştirilen parça ile global tutarlılığı sağlayan parça birleştirilir. Daha sonra eşleştirme işleminde kullanılacak yeni kritik noktalar kümesi oluşturulur. Yeni kritik noktalar kümesi, yerleştirilen parçanın ve global tutarlılığı sağlayan parçanın kritik noktaları içermektedir. Fakat çerçeveye yerleştirilen parçaların birleşim yerindeki kritik noktalar bu kümeye dahil edilmemektedir.

Adım 8: Çerçeveye yerleştirilen parçalar ile aday komşu parçalar benzer şekilde kritik noktalar kümesi üzerinden birbirleriye eşleştirilir. Global tutarlılığı sağlayan parça tespit edilir ve çerçevedeki diğer parçalar ile birleştirilir. Yeni kritik noktalar kümesi oluşturulur. Eşleştirme işlemi çerçevede bir parçanın yerleştirilmesi için yeterli boşluk kalmayınca kadar devam ettirilir.

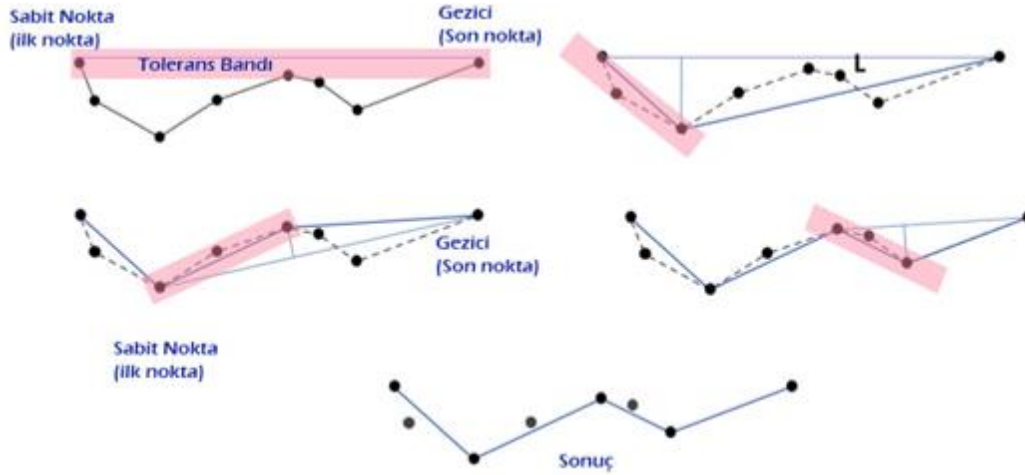
Adım 9: Yerleştirilme işleminde parça kalmadıysa işlemler sonlandırılır. Yerleştirilecek parçalar varsa boş bir çerçeve oluşturulur. Diğer bir nesnenin yeniden oluşturulması için Adım 4'e geri dönlür.

Bu çalışmada kenarlarının eşleştirilmesinde işlem maliyetinin azaltılması için Douglas Peucker [123] yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu yöntemin detayları aşağıda verilmiştir.

Douglas Peucker algoritması özyinelemeli bir yapıya sahiptir ve çizgi basitleştirme işlemi kullanılır. Bu yöntemde çizgi basitleştirilmesinde bir tolerans bandı belirlenir. gerekmektedir. Söz konusu algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

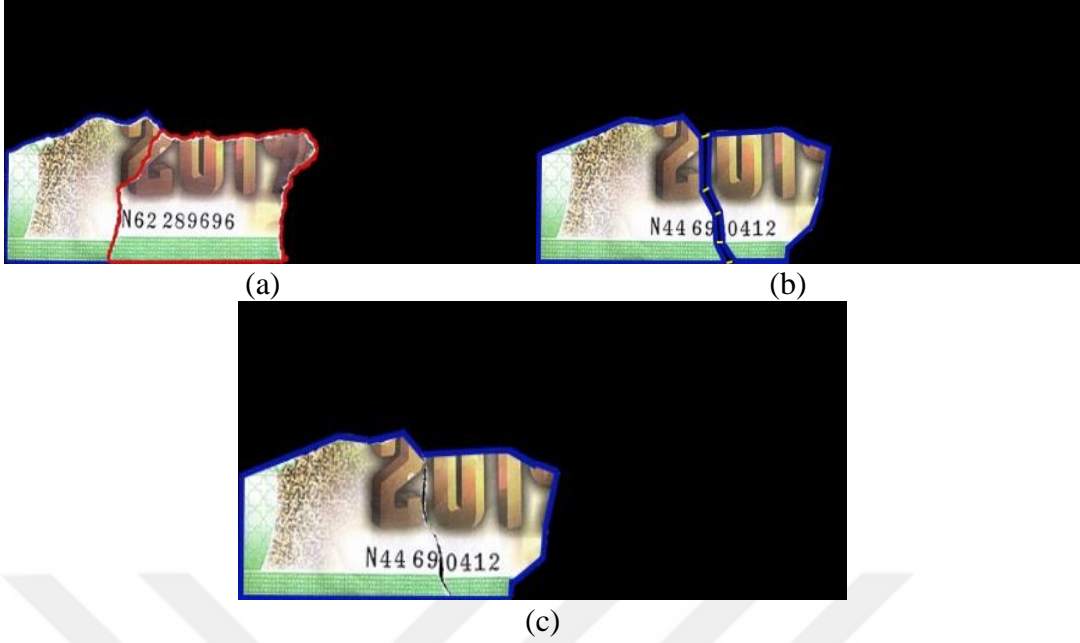
- Çizginin başlangıç ve bitiş noktalarını belirlenir.
- Sabit nokta olarak ilk etapta çizginin başlangıç noktası seçilir. Çizginin son noktası ise gezici nokta olarak belirlenir.
- Bu iki nokta arasında bir doğru çizilir.
- Çizgi üzerindeki ara noktalardan sabit ve gezici noktaların oluşturduğu doğruya dikler inilerek en uzak olan nokta bulunur.
- En uzak noktadan inilen dikin boyu maksimum tolerans bandından küçük olduğu durumda doğru parçasının tüm çizgiyi temsil etmesi için yeterli olduğu kabul edilir. Bu koşul gerçekleşmezse doğruya en uzak olan nokta, yeni gezici nokta olarak belirlenir.
- Bu işlem tolerans bandından küçük nokta kalmayıncaya kadar devam eder.

Douglas Peucker algoritmasının işlem adımları Şekil 2.27’de bir örnek üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Douglas Peucker algoritması ile çizgi basitleştirme işlemi

Çoklu yeniden oluşturma işlemlerinde global tutarlılığın sağlanması için parçaların üst üste binmemesi gerekir. Bununla birlikte aday parça çiftinin en fazla eşleşen kritik nokta sayısına sahip olması gerekir. Örnek olarak Şekil 2.28’de çerçeveye yerleştirme işleminde global tutarlılığın sağlanması gösterilmiştir.



Şekil 2.28. (a) Çakışma olan (b) global tutarlılığın sağlayan parça çifti (c) parça çiftinin birleştirilmesi

Şekil 2.28.a'da yerleştirme işleminde üst üste binen parçalar gösterilmiştir. Bu parçaların farklı nesnelere ait olduğu varsayımı yapılmıştır. Şekil 2.28.b'de Douglas Puecker algoritması ile parça sınır karmaşıklığı azaltılıp parçaların sınırlarındaki kritik noktalar üzerinden yapılan eşleştirme işlemi gösterilmiştir. Söz konusu parça çiftinin global tutarlılığı sağladığı varsayılmıştır. Şekil 2.28.c'de ise global tutarlılığı sağlayan parça çiftinin birleştirilmesi gösterilmiştir. Parça çifti birleştirildiğinde çerçevede eşleştirme işleminde kullanılacak yeni sınırlarının oluşturulması gösterilmiştir.

2.2. Parçalanmış Nesnelerin Yeniden Oluşturulma Süreçlerinin Hızlandırılması

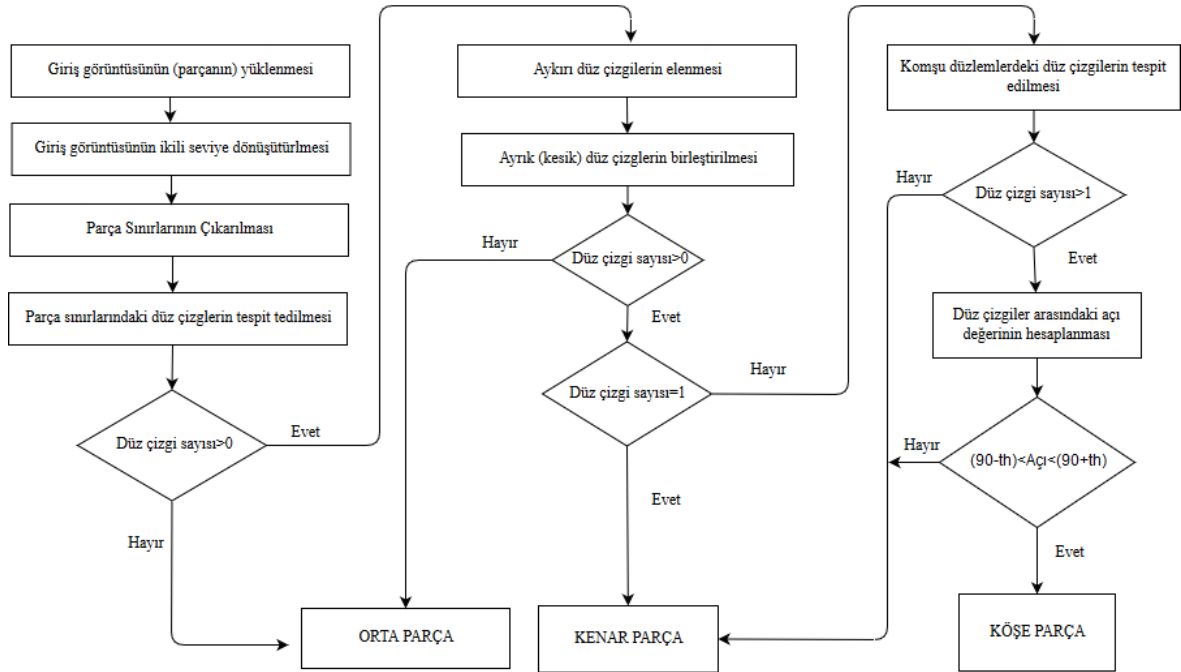
Büyük ölçekli yapboz problemlerinin daha etkili bir şekilde çözülmesi için uygulanan yaklaşımlardan biri parçaların kendi içlerinde gruplandırılmasıdır. Literatürde bu yaklaşım global tutarlılık olarak adlandırılmış ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır [11, 22-24]. Parçalar ilk önce parçalar, dış/çerçeve (köşe ve kenar) ve iç kısımda (orta) bulunma durumuna göre kendi içlerinde gruplandırılmıştır. Daha sonra dış/çerçeve kısımdaki parçalar bir araya getirilmiş ve ardından iç kısımdaki parçalar yerleştirilerek problem daha etkili bir şekilde çözülmüştür. Fakat söz konusu bilgisayar destekli yöntemler oyun/eğlence amaçlı geliştirilen yapbozlar problemleri ile ilgilidir.

Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması, yapboz problemlerine göre çok daha komplike bir yapıya sahiptir. Çünkü geliştirilen bilgisayar destekli yöntemin birçok alt problemi ele alması gerekir. Örneğin yapboz parçalarının kenar çeşitliliği az ve yapıları net bir şekilde belirlenmişken; nesne/görüntü parçalarının kenar çeşitliliği belli değil ve kenar yapıları oldukça kompleks yapıya sahiptir [9, 53-55]. Ayrıca parça kenarlarında hasarlar olabilmektedir. Dolayısıyla parçaların kendi içlerinde gruplandırılması kendi başına bir araştırma konusudur. Bu çalışma ile literatürde ilk defa parçalanmış nesnelerin kendi içlerinde gruplandırılması derinlemesine ele alınmıştır. Parçalanmış nesnelerin ön gruplaması yapılarak yeniden oluşturma süreçleri hızlandırılmaya çalışılmıştır.

Bu kısım gruplandırma yöntemi ve gruplandırma işlemi ile yeniden oluşturulma sürecinin hızlandırılması şeklinde iki başlık altında aşağıda açıklanmıştır.

(a) Nesne parçalarının kendi içlerinde gruplandırılması

Nesne parçalarını kendi içlerinde gruplayan yöntemin akış diyagramı Şekil 2.29'da verilmiştir.

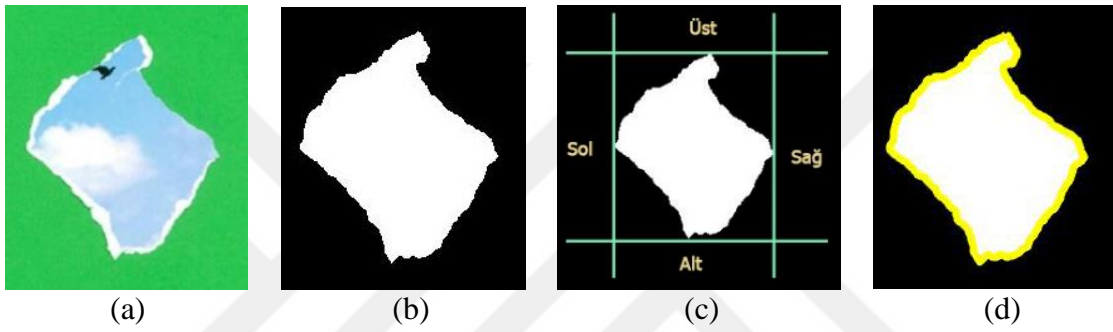


Şekil 2.29. Önerilen gruplama yönteminin akış diyagramı

Önerilen gruplama yönteminin detayları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

1. Parçaların sınırlarının tespiti

Bu aşamada ilk etapta parçalara ait pikseller belirlenmektedir. Parçalara ait pikseller, CIELab renk modeli tabanlı yaklaşım ile belirlenmektedir. Daha sonra parçaların sınırları kontur bilgisi üzerinden sınır izleme algoritması [113] kullanarak çıkarılmaktadır. Sınır izleme algoritmasında referans başlangıç noktasının belirlenmesi ve parçaların gruplandırılmasında kolaylık sağlamak için parça görüntüsü dört düzlem (üst, sol, sağ ve alt) üzerinde değerlendirilmeye alınmaktadır. Şekil 2.30'da bu aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 2.30. (a) Bir paraya ait görüntü (b) CIELab renk modeli tabanlı yaklaşım ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi (c) görüntünün düzlemler üzerinde incelenmesi (d) parça sınırlarının çıkarılması

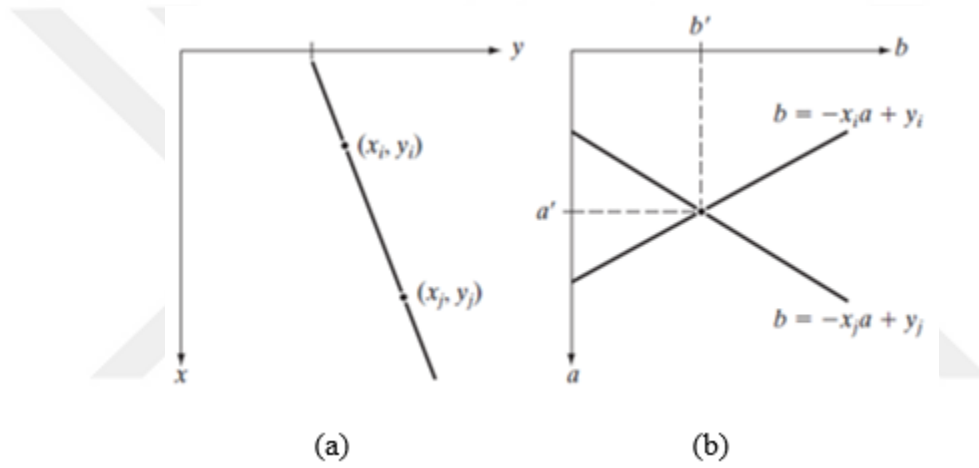
Şekil 2.30.a'daki parça görüntüsü CIELab renk modeli tabanlı yaklaşım ile Şekil 2.30.b'deki gibi ikili seviyeye dönüştürülmüştür. Beyaz pikseller parçaya aittir. Sınır izleme algoritması ile parçanın konturları çıkarılmasında başlangıç referans nokta Şekil 2.30.c'deki en üst, sol, sağ veya alt noktalardan biri seçilmektedir. Daha sonra sınır izleme yöntemi ile parçanın sınırları tespit edilerek Şekil 2.30.d'de sarı renkle gösterilmiştir.

2. Parça sınırlarında düz çizgilerin tespit edilmesi

Bu aşamada parçaların yapısal özellikleri çıkarılır. Bir parçanın her iki komşu kenarında düz çizgi varsa ve bu kenarlar birbirine dik ise söz konusu parça köşe parça olarak gruplandırılır. Eğer parça sınırlarında tek bir düz çizgi varsa söz konusu parça kenar parça olarak gruplandırılır. Parçanın hiçbir kenarında düz çizgi tespit edilmemişse söz konusu parça orta parça olarak gruplandırılır. Parça sınırlarında düz çizgilerin tespit edilmesi için Hough yöntemi [113, 124] kullanılmaktadır. Hough dönüşüm detayları aşağıda verilmiştir.

(a) Hough Dönüşümü

Bir görüntüdeki şekilleri saptamada kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım ile düz doğru, çember ve elips gibi matematiksel olarak ifade edilebilen düzgün geometrik şekiller tespit edilebilmektedir. Hough dönüşüm ile düz çizgilerin tespit edilmesi için bir doğru denklemi tanımlanır. Doğru denklemi, xy düzleminde $(x_i$ ve $y_i)$ noktaları ile $y_i = ax_i + b$ şeklinde ifade edilsin. Bu doğru denklemi parametre uzayında $b = -ax_i + y_i$ şeklinde yazılarak yeniden temsil edilir. Doğruyu oluşturan xy düzlemindeki bütün noktalar, parametre uzayında yeniden temsil edildiklerinde (a', b') noktasında kesişen çizgilere sahip olacaktır. Örnek olarak Şekil 2.31' de söz konusu durum gösterilmiştir.



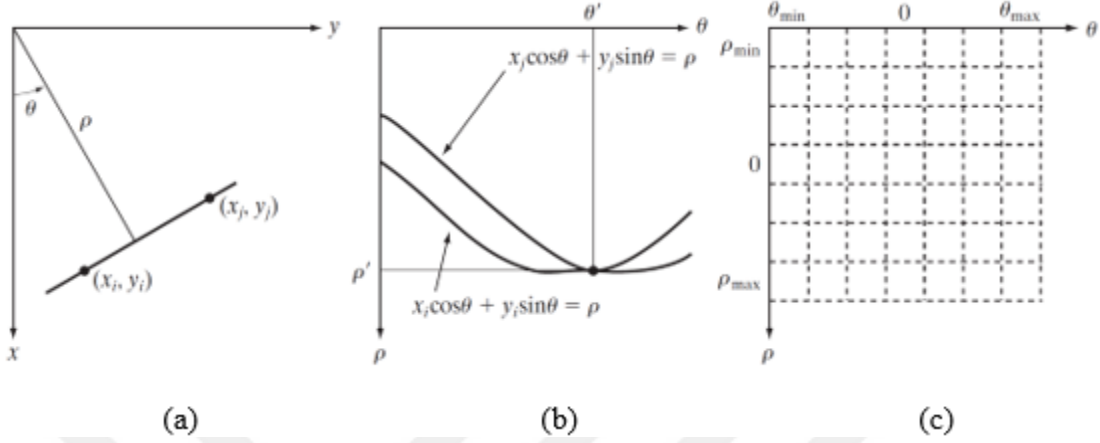
Şekil 2.31. (a) x - y düzlemi (b) parametre uzayı

Şekil 2.31.a'da xy düzleminde bir doğru üzerinde (x_i, y_i) ve (x_j, y_j) noktaları verilmiştir. Doğru denklemi parametre uzayında yeniden temsil edildiklerinde söz konusu noktalarla ilgili çizgiler Şekil 2.31.b'deki gibi (a', b') noktalarında kesişmiştir. Bu yaklaşımın pratik uygulamalardaki bir zorluğu çizginin dikey yöne yaklaşması durumunda a ile temsil edilen eğimin sonsuza gitmesidir. Bu zorluğu aşmak için Hough Dönüşümünde (2.26) 'daki polar koordinat denklemi kullanılır [113, 124].

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2.26)$$

Burada x ve y ; xy düzlemi üzerinde görüntünün koordinatlarını, ρ , xy görüntü düzlemindeki düz çizginin orijine olan dik uzaklığını ve θ ise dik çizginin x eksenine ile

yaptığı açıyı temsil etmektedir. Söz konusu denklem, Şekil 2.32'de temsil edilerek açıklanmıştır.



Şekil 2.32. (a) xy düzlemindeki çizginin (ρ, θ) parametreleri ile gösterimi (b) $\rho\theta$ düzlemindeki sinüs biçimli eğriler (c) $\rho\theta$ düzleminin akümülatör hücelere bölünmesi

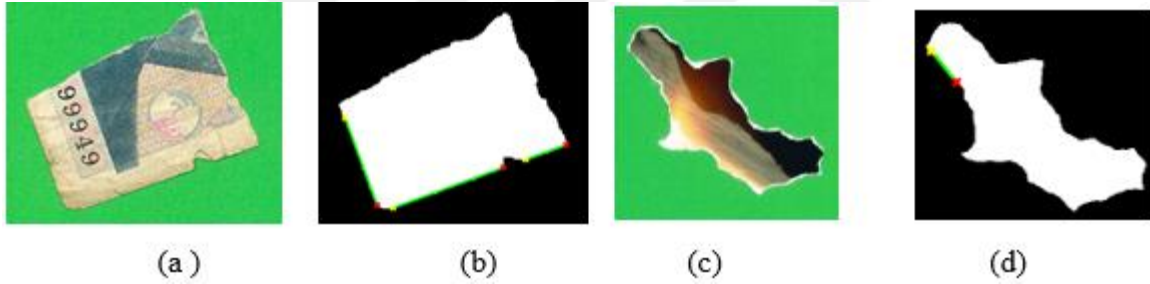
Şekil 2.32.a'da yatay bir çizgi $\theta=0$ eğimine sahip olacak x sınırında bulunacaktır. Benzer şekilde dikey bir çizgi $\theta=90$ eğimine sahip y pozitif veya $\theta=-90$ eğimine sahip y negatif sınırında bulunacaktır. Şekil 2.32.b'de xy düzlemindeki belirli bir (x_k, y_k) noktasından geçen çizgiler, $\rho\theta$ düzleminde sinüs biçimli eğriler oluşturmakta ve bu eğriler (ρ', θ') noktalarında kesişmektedir. Örnek olarak xy düzlemindeki (x_i, y_i) ve (x_j, y_j) noktaları, Şekil 2.32.b'deki gibi (ρ', θ') noktalarında kesişmiştir. Hough dönüşümünde $\rho\theta$ düzlemi akümülatör hücelere bölünmektedir. Böylece Hough dönüşüm daha kolay hesaplanabilir bir yapıya dönüşmektedir. Şekil 2.32.c'de $\rho\theta$ düzleminin akümülatör hücelere bölünmesi gösterilmiştir. Burada $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$, $-90 \leq \rho \leq 90$ aralıklarını temsil etmektedir. $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$ ise $-D \leq \theta \leq D$ beklenen parametre değerlerini ifade etmektedir. D , bir görüntüdeki zıt köşeler arasındaki maksimum uzaklığı temsil etmektedir. Akümülatör hücresindeki bir değer, xy düzlemindeki bir P noktasını ifade etmektedir. Düz çizgiler, akümülatör dizisinde en yüksek değerler üzerinden tespit edilmektedir [113].

(b) Hough dönüşümün parça sınırlarına uygulanması

Hough dönüşüm metodu, belirlenen eşik değerlerine göre bir görüntüde düz çizgileri tespit etmektedir. Söz konusu eşik değerleri; tespit edilecek düz çizginin minimum

uzunluğu, aynı hat (segment) üzerinde bulunan çizgiler arasındaki azami mesafe ve Şekil 2.32.b'de gösterildiği parametre uzayında kesişen nokta sayısı ile ilgilidir. Aynı hat üzerinde bulunan çizgiler arasındaki azami mesafe ve parametre uzayında kesişen nokta sayısı gerçek veriseti üzerinde denemeler yapılarak belirlenmiştir. Özellikle parça kenarlarında tahribatlar olan parçalar göz önünde bulundurulmuştur. Parametre uzayında kesişen nokta sayısı 2 ve aynı hat (segment) üzerinde bulunan çizgilerin aralarındaki azami mesafe 20 piksel olarak belirlenmiştir. Hough dönüşüm tarafından parça sınırlarında tespit edilecek minimum düz çizgi uzunluğunu ise parçaya göre otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada parça sınırlarına minimum kapalı çevrim uygulanmaktadır. Oluşan kapalı çevrimdeki en küçük kenarın uzunluğu, Hough dönüşümde saptanacak minimum çizgi uzunluğu olarak belirlenmektedir.

Hough dönüşüm yönteminin parça sınırlarına uygulanması örnek olarak Şekil 2.33'de gösterilmiştir.

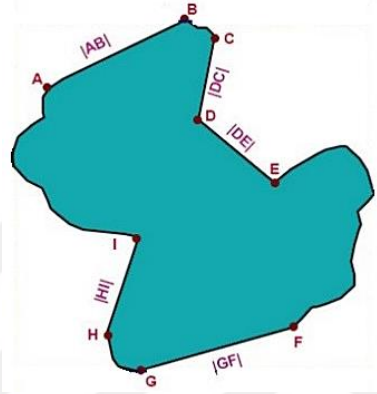


Şekil 2.33. (a) Tahribata uğramış bir banknot parçası (b) banknot parçasının sınırlarında düz çizgilerin tespiti (c) bir kartpostala ait parça (d) kartpostal parçasının sınırlarında düz çizgilerin tespiti

Şekil 2.33.a'da verilen tahribata uğramış bir köşe parçanın sınırlarında düz çizgiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.33.b'de görüldüğü gibi parçanın bir kenarında tahribat olduğu için iki tane düz çizgi belirlenmiştir. Söz konusu düz çizgilerin birleştirilerek tek bir düz çizgi haline getirilerek parçanın yapısal özelliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.33.c'de ise köşe veya kenar parça özelliği göstermeyen bir fotoğraf parçasının sınırlarında hatalı olarak düz çizgiler tespit edilmiştir. Bu nedenle söz konusu aykırı düz çizgilerin elenerek parçanın yapısal özelliğinin ortaya konması gerekmektedir.

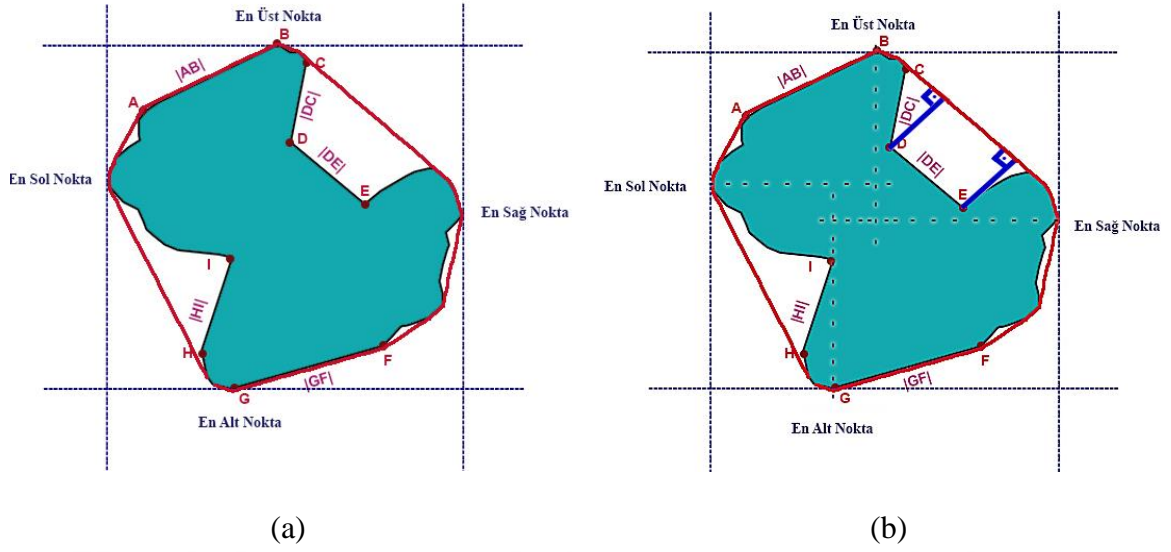
3. Aykırı düz çizgilerin elenmesi

Parça sınırlarında bulunan düz çizgiler, köşe veya kenar parçanın şekilsel özelliği içerisinde görülmesi için bu çizgilerin konveks yapı oluşturması gerekir. Örneğin Şekil 2.34'te $|AB|$ ve $|GF|$ kenarları konveks yapı oluştururken; $|DC|$, $|DE|$ ve $|HI|$ kenarları, konkav yapı özelliği göstermektedir. Dolayısıyla $|DC|$, $|DE|$ ve $|HI|$ sınırları, hiçbir şekilde düzlemlere teğet olacak şekilde hizalanamaz. Bu nedenle $|DC|$, $|DE|$ ve $|HI|$ düz çizgiler, köşe veya kenar parçaların şekil yapı özelliğine dahil edilebilecek düz çizgiler olamaz.



Şekil 2.34. Bir parçanın sınırlarında bulunan düz çizgiler

Şekil 2.34'deki $|DC|$, $|DE|$ ve $|HI|$ aykırı düz çizgilerin elimine edilmesi için parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanmaktadır. Aykırı düz çizgilerin elenmesi ve bir parçanın köşe, kenar veya orta parça olup olmadığının tespitini kolaylaştırmak için parça sınırları dört (üst, alt, sol ve sağ) bölgeye ayrılıp incelenmektedir. Söz konusu işlemler Şekil 2.35'de gösterilmiştir.



Şekil 2.35. (a) Parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanması (b) parça sınırlarının dört bölgeye ayrılıp düz çizgilerin konveks kenarlar ile karşılaştırılması

Şekil 2.35'te aykırı düz çizgilerin elenmesi için ilk etapta üst sol, üst sağ, alt sol ve alt sağ kısımlarda bulunan düz çizgiler tespit edilir. Daha sonra parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanır ve konveks kenar noktalar kümesi elde edilir. Bu konveks noktalar, aynı şekilde üst sol, üst sağ, alt sol ve alt sağ kısımda bulunma durumlarına göre gruplandırılır. Şekil 2.35.a'da $|AB|$ düz çizgisi ve A konveks noktası üst sol bölgede yer almaktadır. Daha sonra bu bölgelerde tespit edilen düz çizgilerin aykırı düz çizgi olup olmadığının tespiti yapılır. Bir çizginin aykırı düz çizgi olması için konkav özelliğini gösterecek eğime sahip olması ya da bu çizginin başlangıç ve bitiş noktaları aynı bölgedeki en yakın konveks kenara olan uzaklıkları, belirli bir değerden fazla olması gerekir. Örneğin Şekil 2.35.b'de $|DC|$ düz çizgisi konkav özelliğini yansıtmakta ve bu doğrunun eğimi bulunduğu bölgedeki (üst sağ) konveks kenarın eğiminden oldukça farklıdır. $|DE|$ düz çizgisinin eğimi ise konveks kenarın eğimine oldukça yakındır. Fakat $|DE|$ düz çizgisinin başlangıç ve bitiş noktalarının konveks kenara olan uzaklığı Şekil 2.35.b'deki görüldüğü gibi fazladır. $|AB|$ düz çizgisi ise belirlenen eğim farkı ve uzaklık kriterlerini geçeceği için aykırı çizgi olarak belirlenmeyecektir.

Parçaların sınırlarındaki geçerli ve aykırı düz çizgilerin tespit edilmesi için geliştirilen yöntemin kaba kodu aşağıda verilmiştir.

Algoritma 2. Parçaların sınırlarındaki geçerli ve aykırı düz çizgilerin tespit edilmesi**Giriş:** Diz çizgiler HL, Minimum Kapalı çevrim CH

DivideFourPlane (HL) // Düz çizgiler kümesini dört bölgeye ayırır

DivideFourPlane (CH) // Kapalı çevrimi dört bölgeye ayırır

Çıkış 1: Düzlemlerdeki düz çizgiler HLA, Kapalı çevrimdeki kenarlar CHA**for** i=1→4 // Düzlem sırası: üst sol, üst sağ, alt sol ve alt sağ

thD // Düz çizginin kapalı çevrimle olan uzaklık eşik değeri

thS //Düz çizginin kapalı çevrimle olan eğimi farkı

if length (HLA[i])>0 // düz çizgi sayısını verir**for** j=1→h // h: İlgili düzlemdeki düz çizgilerin sayısı

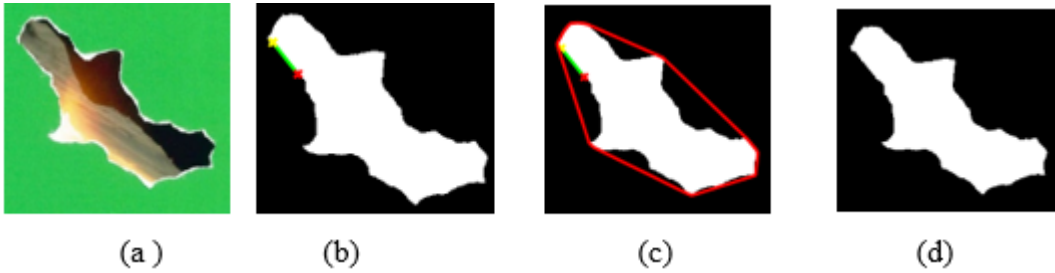
eykL=FCE () // Konveks kenara en yakın düz çizginin bulunması

dl=DCE (eykL, CHA[i]) // En yakın düz çizgi ile konveks kenar arasındaki uzaklık

sd=SCE (eykL, CHA[i]) // Konveks kenar ile düz çizginin eğim farkının hesaplanması

if dl<thD and sd<thS **then** **Çıkış 2:** Geçerli düz çizgi**else** **Çıkış 3:** Aykırı düz çizgi**end if****end for****end if****end for**

Şekil 2.36'da parça sınırlarında aykırı düz çizgilerin elenmesi ile ilgili bir örnek verilmiştir.

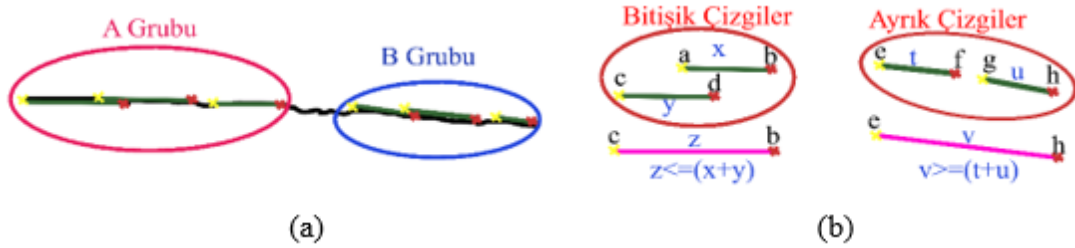


Şekil 2.36. (a) Bir parça görüntüsü (b) parça sınırlarında Hough Dönüşümün uygulanması (c) kapalı çevrimin uygulanması (d) aykırı düz çizgilerin elenmesi

Şekil 2.36.a'da köşe veya kenar parça olmayan bir parça verilmiştir. Fakat Hough dönüşüm uygulandığında parçanın sınırlarında Şekil 2.36.b'de görüldüğü düz çizgi tespit edilmiştir. Bu düz çizginin aykırı (hatalı) bir düz çizgi olup olmadığını belirlemek için parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanmıştır. Kapalı çevrim Şekil 2.36.c'de kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile bu çizginin aykırı olduğu başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Aykırı düz çizgi Şekil 2.36.d'deki görüldüğü başarılı bir şekilde elenmiş ve söz konusu parça orta parça olarak gruplandırılmıştır.

4. Ayırık çizgilerin birleştirilmesi

Parça kenarlarında oluşan tahribatlardan dolayı parça sınırlarında iç içe geçen veya ayırık (kesik) düz çizgiler tespit edilebilmektedir. Dolayısıyla parçanın yapısal özelliğini belirlemek için söz konusu düz çizgilerin birleştirilmesi gerekir. Önerilen yöntemde ilk önce düz çizgiler gruplandırılmaktadır. Gruplandırma işleminde düz çizgilerin eğim farkına bakılmaktadır. Eğim farkı belirlenen eşik değerinden küçük veya eşit ise bu çizgiler aynı kümede toplanmaktadır. Önerilen eğim eşik değeri 0.1-0.5 gibi küçük bir sayı aralığındadır. Şekil 2.37'te bir düzlemde verilen düz çizgilerin gruplandırılması örneklendirilmiştir.

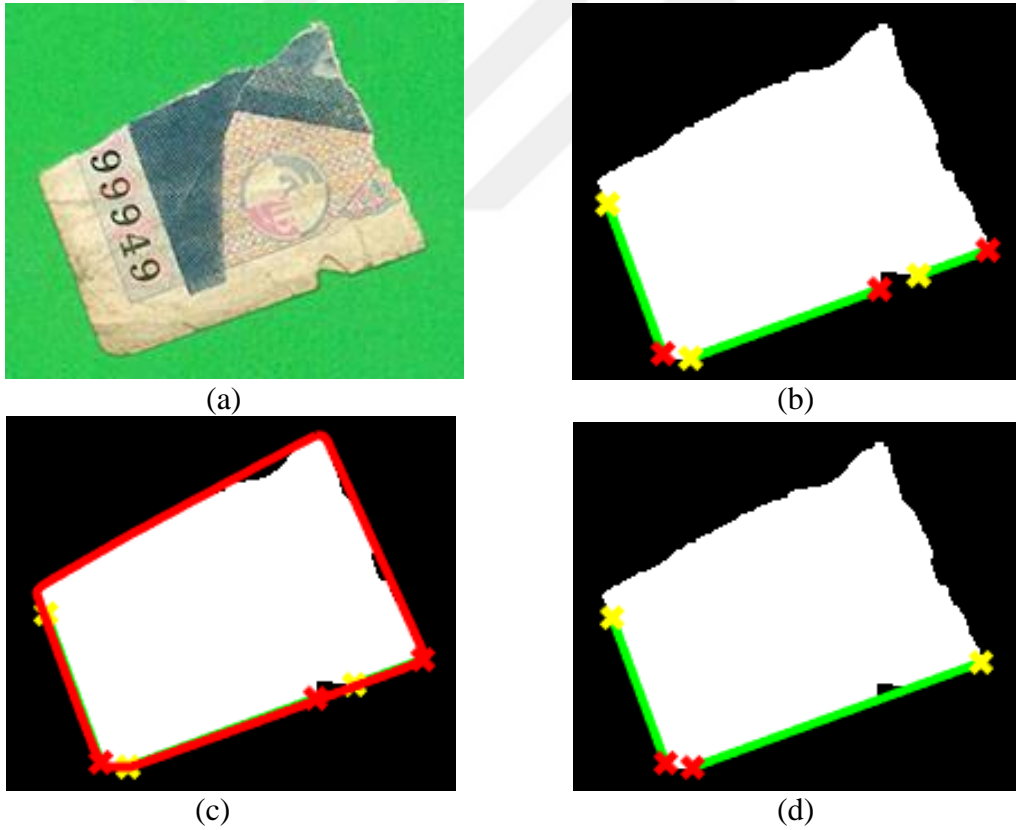


Şekil 2.37. Çizgilerin gruplandırılması (a) ayırık (b) iç içe geçen düz çizgiler

Şekil 2.37'de parça sınırlarındaki çizgilerin başlangıç noktası sarı, bitiş noktası kırmızı ve çizgiler yeşil renkte gösterilmiştir. Şekil 2.37.a'da benzer eğime sahip düz çizgiler gruplandırılacak olursa; bu çizgiler iki grup altında toplanacaktır.

Gruplandırma işleminden sonra parça sınırındaki düzlüğün belirlenmesinde ilk önce her bir kümedeki çizgiler, kendi içlerinde birleştirilmektedir. Daha sonra oluşan yeni düz çizgiler tekrar birleştirilerek tek bir düz çizgi elde edilmeye çalışılmaktadır. Birleştirme işlemi önemli bir husus çizgilerin ayırık mı yoksa iç içe geçen çizgiler mi olduğudur.

Çünkü iç içe geçen çizgiler birleştirildiğinde oluşan yeni çizginin uzunluğu, söz konusu çizgilerin uzunluklarının toplamından küçük olmalıdır. Ayrık çizgiler birleştirildiğinde ise oluşan yeni çizginin uzunluğu söz konusu ayrı çizgilerin toplamına eşit veya büyük olmalıdır. Örneğin Şekil 2.37.b’de gösterilen $|ab|$ ve $|cd|$ düz çizgilerinin uzunlukları toplamı c ve b noktaları arasındaki uzunluktan fazla olduğu için bu çizgiler iç içe geçen çizgilerdir. Dolayısıyla bu çizgiler birleştirildiğinde pembe çizgi ile gösterilen bir düz çizgi elde edilecektir. $|ef|$ ve $|gh|$ çizgilerinin uzunlukları toplamı e ve h noktaları arasındaki uzunluktan küçük olduğundan bu çizgiler ayrı çizgilerdir. Ayrık çizgilerin birleştirilmesinde çizgiler arasında mesafe belirlenen bir eşik değerinden (10-20 piksel gibi) küçük ise bu çizgiler birleştirilmektedir. Diğer durumda çizgiler arasındaki mesafeye bakılmaksızın yapılacak birleştirme işlemleri hatalı sonuçlar doğuracaktır. Şekil 2.38’de ayrı çizgilerin birleştirilmesi ile ilgili örnek bir uygulama sonucu verilmiştir.

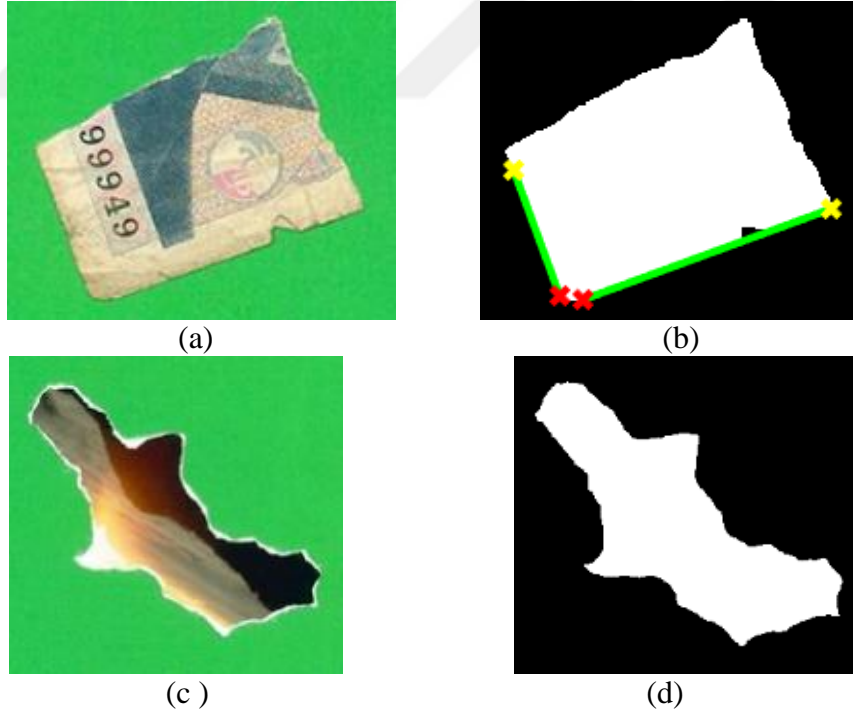


Şekil 2.38. (a) Parça (b) Hough dönüşümü ile tespit edilen düz çizgiler (c) sınırlara kapalı çevrim uygulanması (d) geçerli ayrı çizgilerin birleştirilmesi

Şekil 2.38'de görüldüğü gibi parçalarda tahribatlar olunca parça sınırlarında ayırık düz çizgiler tespit edilmektedir. Önerilen yöntem ile ayırık düz çizgiler birleştirilerek parçaların şekilsel özellikleri Şekil 2.38.d ve h'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde çıkartılmıştır

5. Tespit edilen düz çizgilere göre parçaların etiketlenmesi

Parçaların gruplandırılmasında parça kenarlarında elde edilen geçerli düz çizgilere bakılır. Eğer parça kenarında hiçbir düz çizgi tespit edilemediyse bu parça orta parça grubuna dâhil edilir. Eğer parçanın kenarlarında tek bir düz çizgi tespit edilmişse bu parça kenar parça olarak etiketlenir. Eğer parça görüntüsünde birden fazla düz çizgi tespit edilmişse bu düzlemler birbirine komşu olup olmadığına bakılır. Tespit edilen düz çizgiler komşu düzlemlerde değilse bu parça yine kenar parça olarak etiketlenir. Eğer parça kenarlarında düz çizgiler komşu düzlemlerde ve aralarındaki açı değeri 90 dereceye yakın bir açı değerine sahipse köşe parça değilse söz konusu parça aday kenar parça olarak gruplandırılır. Şekil 2.39'da parçaların gruplandırılması ile ilgili birkaç örnek verilmiştir.



Şekil 2.39. Parçaların elde edilen nihai sonuçlara göre etiketlenmesi

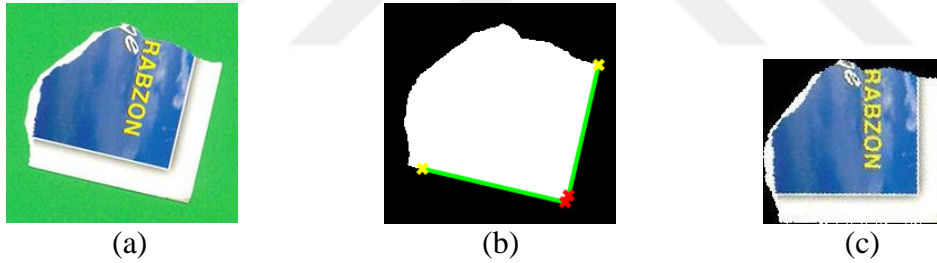
Şekil 2.39'da görüldüğü gibi parçalar, kenar ve orta olarak başarılı bir şekilde gruplandırılmıştır. Bir köşe parçanın kenarlarının deformasyona uğramasından dolayı

komşu kenarlarında tespit edilen düz çizgiler arasındaki açı tam olarak 90 derece elde edilemeyebilir. Şekil 2.39.b’de düz çizgiler arasındaki açı 89.78° olarak hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamında geliştirilen ön gruplama yöntemi, yapısal özelliği kaybolmayacak seviyede hasarlar içeren parçaların gruplandırılması için geçerlidir. Örneğin bombalama veya deprem gibi olaylarda freskler parçalandığında parçalarda tahribatlar oldukça fazla olmaktadır. Bu nedenle söz konusu parçaların şekilsel özelliği üzerinden gruplandırılması ve eşleştirilmesi mümkün olamamaktadır [18]. Ayrıca parçalar bilgisayar ortamına aktarılırken parçaların kenarlarında yapay olarak kırılmalar (jagged edge) olabilmektedir. Dolayısıyla ele alınan parça görüntüleri, düşük çözünürlükte (72, 96 dpi) ve parçanın yapısal özelliğini yansıtmayacak seviyede olmamalıdır.

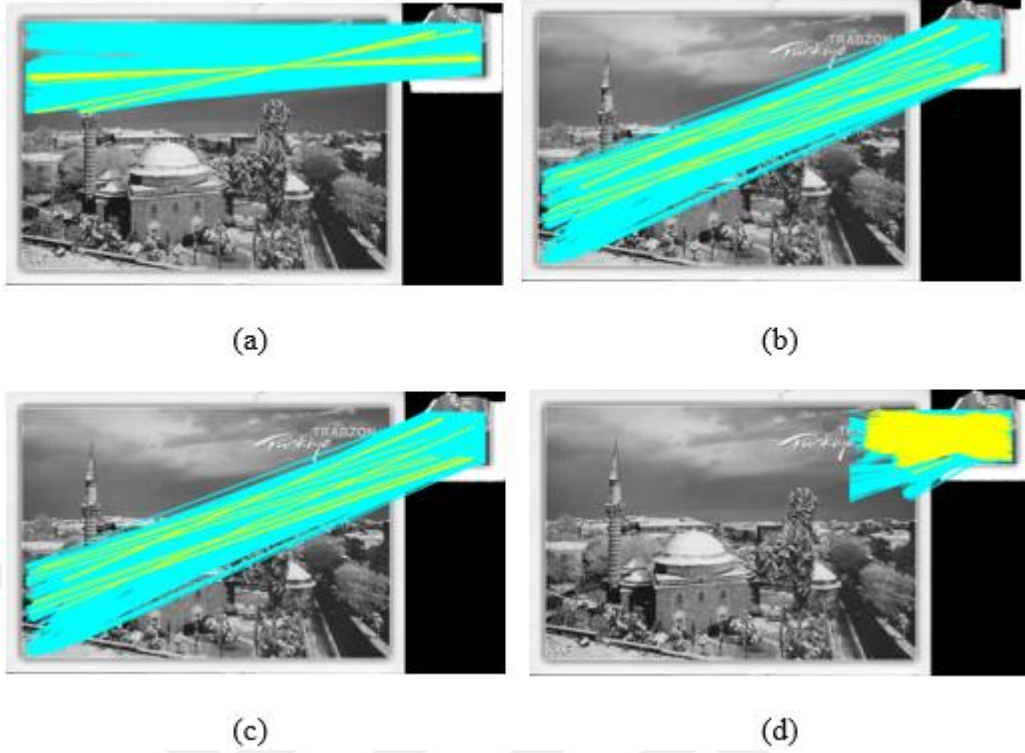
(b) Ön gruplandırma yöntemi ile yeniden oluşturulma sürecinin hızlandırılması

Problem çözümünde ön gruplama yapılmadığı takdirde parçalar referans görüntünün tamamı ile eşleştirilmektedir. Ön gruplama yapıldığında parçaların referans görüntüler ile eşleştirileceği bölgeler belirlenmektedir. Örnek olarak Şekil 2.40’ta bir parçanın gruplandırılması verilmiştir.



Şekil 2.40. (a) Kartpostal parçası (b) parçanın şekil özelliğinin çıkarılması (c) parçanın hizalanması

Şekil 2.40’ta verilen parça, köşe parça olarak başarılı bir şekilde gruplandırılmıştır. Önerilen gruplama yöntemi ile parçanın rotasyon açısı 13.19 derece olarak tespit edilerek hizalanması Şekil 2.40. c’de gösterilmiştir. Böylece bu parçanın referans görüntüde eşleştirileceği köşe bölgelerin boyutları belirlenmiştir. Dolayısıyla Şekil 2.40’ta verilen parça referans görüntünün tamamı yerine köşe bölgeleri ile eşleştirilecektir. Bu parçanın eşleştirilmesi Şekil 2.41’de verilmiştir.



Şekil 2.41. Parçanın referans görüntüde yalnızca köşe bölgeler ile eşleştirilmesi

Şekil 2.41’de verilen kartpostal parçası referans görüntünün yalnızca köşe bölgeleri ile eşleştirilmiştir. Eşleştirme işleminde Zernike momentler kullanılmıştır. İsbetli eşleşen blokların merkez noktaları sarı çizgiler ile gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımda bir parçanın referans görüntüde ait olduğu bölgenin (köşe ve kenar kısımlar) belirlenmesi için isabetli eşleme sonuçları karşılaştırılmaktadır. En fazla isabetli eşleşme sonucu veren bölge parçanın referans görüntüde ait olduğu konumu göstermektedir. Şekil 2.41.d’de görüldüğü gibi parçanın ait olduğu bölge, sağ üst köşe olarak başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Parçaların yerleştirme işlemi yapıldıkça eşleştirilecek bölge (köşe, kenar) sayısı azalacaktır. Önerilen yöntemde aynı grupta bulunan parçaların en büyük boy ve en uzunlukları saptanarak referans görüntüde eşleştirilecek bölgelerin boyutları çıkarılmaktadır.

Tüm köşe parçalar referans görüntü ile eşleştirilip boş bir çerçeveye yerleştirildikten sonra kenar parçaların referans görüntüde eşleştirileceği kenar bölgeler belirlenmektedir. Köşe ve kenar parçaların yerleştirilmesi ile orta parçaların referans görüntüde eşleştirileceği orta bölge belirlenmektedir. Örnek olarak Şekil 2.42’de bir orta parçanın yalnızca referans görüntünün orta bölgesi ile eşleştirilmesi gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2.42. (a) Orta parçaların yerleştirileceği bölgenin çıkarılması (b) orta parçanın referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 2.42.a'da görüldüğü gibi köşe ve kenar parçaların eşleştirilip çerçeveye yerleştirildiğinde orta parçanın referans görüntüde eşleştirileceği bölgeler belirlenmiştir. Şekil 2.42.b'de söz konusu orta parçanın referans görüntünün orta bölgesi ile eşleştirilmesi gösterilmiştir. Önerilen ön gruplama yöntemi sayesinde parçalar yalnızca referans görüntünün belirli bölgeler ile eşleştirileceği için problemin çözüm süresi azalacaktır.

Bu çalışmada geliştirilen ön gruplama yöntemi, yeniden oluşturma süreçlerinde referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerde de kullanılabilir. Önerilen ön gruplama yöntemi sayesinde parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturma süreçleri hızlandırılabilir.

2.3. Yeniden Oluşturma Sonuçlarının İlgili Oldukları Alana Göre Değerlendirmesi

Bu kısımda yeniden oluşturma sonuçları; bankacılık ve restorasyon alanında ele alınarak yeni çözüm önerileri sunulmuştur. Ayrıca yeniden oluşturma süreçlerinde referans görüntü kullanan bilgisayar destekli sistemlerin başarı oranını hesaplayan bir yaklaşım sunulmuştur.

(a) Yeniden oluşturma sonuçlarının bankacılık alanında ele alınması

Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası tarafından ödeme yapılması için bir banknotun yüzeyindeki kayıp oranı %50'nin altında olması gerekmektedir [125]. Bu çalışmada parçalanmış bir banknotun veya herhangi bir nesnenin yüzeyindeki kayıp oranını

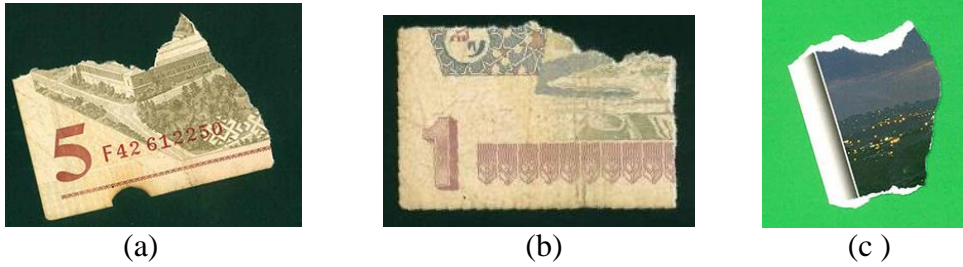
hesaplayan pratik bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda yakıp oranı (2.27)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$TBL = 100 - \left[\left(\frac{FS}{REFS} \right) \times 100 \right] \quad (2.27)$$

Burada parçaların toplam yüzey alanı FS, referans görüntünün yüzey alanı REFS ile ifade edilmiştir. REFS, referans görüntünün yatay ve dikey uzunlukları çarpılarak kolayca bulunabilir. FS ise parçaların toplam yüzey alanı (piksellerin toplam sayısı) hesaplanarak bulunur. Eğer söz konusu nesne sentetik ve nesnenin eksik parçası yoksa parçaların yüzey alanı toplamı referans görüntü ile eşit olmaktadır. Fakat söz konusu nesne gerçek ve nesnenin eskik parçası yoksa parçaların yüzey alanları toplamı referans görüntü ile aynı olmayabilir. Bu farklılık:

- Nesneye ait bazı parçaların mevcut olmaması ve parçaların bazı kısımlarının eksik olması,
- Buruşmuş bazı parçaların olması ve bu parçaların tam olarak düzeltilemeden taratılarak bilgisayar ortamına aktarılması,
- Banknot yırtılırken bazı parçaların kenarlarında soyulmalar olması

gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Söz konusu faktörler ile ilgili Şekil 2.43'te birkaç örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.43. (a) Banknot parçasının kenarındaki eksilme (b) banknot (c) kartpostal parçasının kenarlarındaki soyulamalar

Eğer banknot yırtılmadan önce eksik kısımları yoksa parçaların yüzey alanlarının toplamı genelde nesnenin yüzey alanından daha büyük olmaktadır. Bunun nedeni Şekil 2.43.b ve c'deki gibi bazı parçaların kenarlarındaki soyulmalardan kaynaklanan yüzey

alanları artışıdır. Soyulmalardan kaynaklanan yüzey artışı (2.28)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$PS = FS - REFS \quad (2.28)$$

Burada REFS, referans görüntünün yüzey alanı, FS parçaların toplam yüzey alanıdır. Parçalanmış banknotlar ile ilgili seçilen örnekler incelendiğinde soyulmalardan kaynaklanan yüzey alan artışı göz ardı edilebilir seviyede (yaklaşık %1 oranına) çıkmıştır.

Şekil 2.44.'te geliştirilen bilgisayar destekli sistem tarafından yeniden oluşturulan bir banknot gösterilmiştir.



Şekil 2.44. Geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulmuş bir banknot

Şekil 2.44'teki yeniden oluşturulan banknotun yüzeyindeki kayıp oranı önerilen yaklaşım ile aşağıda hesaplanmıştır.

$$TBL (50 TL) = 100 - \left[\left(\frac{122315}{164346} \right) \times 100 \right] = \%25.57$$

Eksik parçası olan bu banknotun yüzeyindeki kayıp oranı ülkemizdeki merkez bankası tarafından belirlenen oranın altında çıkmıştır.

(b) Bilgisayar destekli sistemlerin başarı oranının hesaplanması

Bu çalışmada bilgisayar destekli sistemlerin başarısını hesaplayan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda başarı oranını (2.29)'daki gibi pratik bir şekilde hesaplamaktadır.

$$PMS = \frac{RBS}{FS} \times 100 \quad (2.29)$$

Burada RBS çerçevede doluluk miktarını veren piksel sayısını ifade etmektedir. FS ise parçaların toplam yüzey alanını veren piksel sayısını ifade etmektedir. Örnek olarak Şekil 2.44'teki yeniden oluşturulma probleminde bilgisayar destekli sistemin başarısı önerilen yaklaşım ile aşağıda hesaplanmıştır.

$$PMS(5YTL) = \left[\left(\frac{117814}{122315} \right) \times 100 \right] = \%96.32$$

Daha önce söz konusu banknotun yüzeyindeki kayıp oranı önerilen yaklaşım ile %25.57 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bir bilgisayar destekli sistemin başarısı, banknotun sağlam yüzey alanı üzerinden ortaya konulması hatalı değerlendirmelere yol açacaktır.

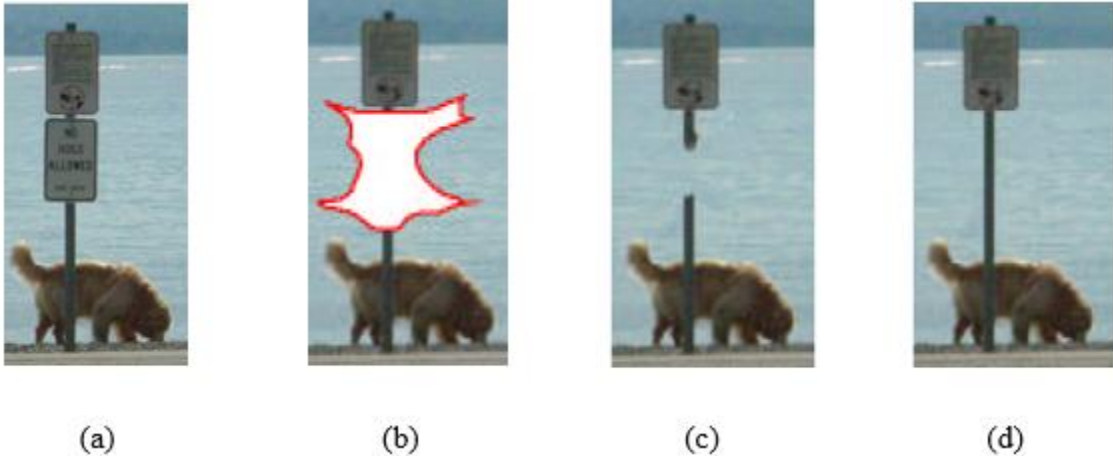
(c) Örnek tabanlı içboyama yöntemi ile yeniden oluşturulan sanat eserlerinin restorasyonu

Bu tez kapsamında yeniden oluşturulan fresklerde oluşan boşlukların doldurulması için örnek tabanlı içboyama yönteminin [122] kullanılması önerilmiştir. Örnek tabanlı içboyama yönteminin detayları aşağıda verilmiştir.

Örnek tabanlı içboyama resim parçasının eksik kısımlarını parçanın diğer kısımlarından en uygun örnekleri alarak yapmaktadır [122]. Söz konusu yöntemin diğer içboyama yöntemine göre bazı avantajları vardır. Bunlar:

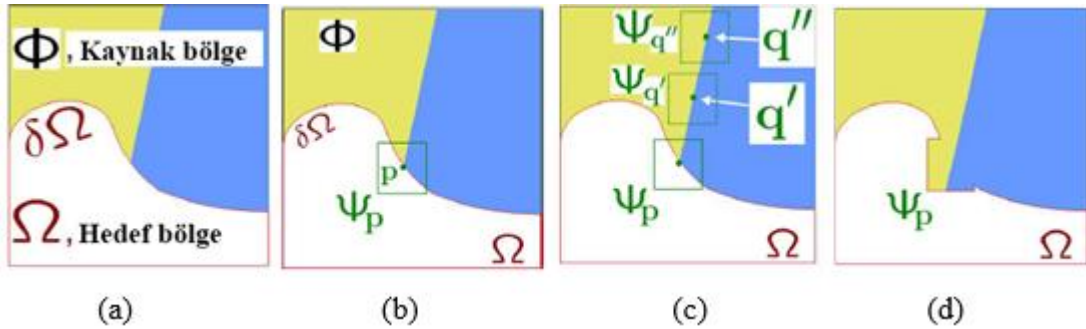
- Yapı ve doku restorasyonunun birlikte yapılabilmesi [126].
- Büyük delikleri (boşlukları) ele alabilmesi [127].
- Sadece basit yapı ve doku bölgeleri için PDE [128] iç boyama yönteminin üstesinden gelemediği büyük hedef bölgelerin inşasını gerçekleştirebilmektedir [129].

Örnek olarak Şekil 2.45'te bir görüntüde istenmeyen kısımların örnek tabanlı iç boyama yöntemi ile kaldırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.45. (a) Orijinal (b) zarar görmüş bir görüntü (c) örnek tabanlı iç boyama yöntemi ile onarılma aşamalarından bir görüntü (d) onarılma işlemi tamamlanmış görüntü [122].

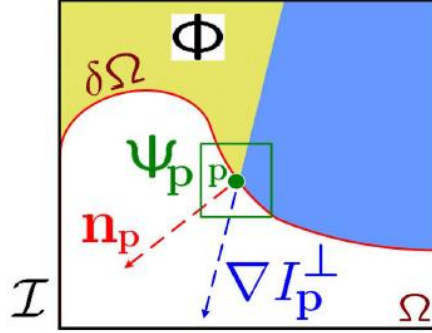
Örnek tabanlı iç boyama yöntemi iteratif bir yapıya sahiptir ve iki temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada verilen tüm yamalara öncelik ataması yapmak ve ikinci adım ise bilinen bölgelerden en iyi eşleşecek yamayı seçmektir. Daha sonra bu seçilen yamalar eksik bölgelerdeki hedeflere yapıştırılmaktadır. Doldurma sırasına göre, metot eksik bölgelerde komşu bölgelerin konumsal bilgilerini kullanarak yapıları doldurmaktadır. Şekil 2.46’da örnek tabanlı iç boyama yönteminin aşamaları verilmiştir.



Şekil 2.46. (a) İmgede yama alınacak ve doldurulacak bölgeler (b) doldurma işlemine başlanması (c) örnek yamanın seçilmesi (d) doldurma işleminin gerçekleştirilmesi [122].

Şekil 2.46’da örnek alınacak bölgeye kaynak bölge (ϕ), doldurulacak bölgeye (boşluğa) hedef bölge (Ω) adı verilmiştir. Hedef bölge belirlendikten sonra yama blok boyutu belirlenmektedir. Yama blok boyutunun belirlenmesinde kullanım kolaylığı

açısından bloğun kenar uzunlukları tek sayı olarak seçilir. Ayrıca seçilen blok boyutu, imgenin kaynak bölgesinde fark edilebilir en küçük doku ögesinden biraz büyük olmasına dikkat edilir [130]. Şekil 2.46.d'deki gibi doğrusal yapı korunacak şekilde doldurma işlemi, önerilen güven ve veri terimleri terim sayesinde gerçekleştirilmektedir. Söz konusu terimler Şekil 2.47 üzerinden açıklanmıştır.



Şekil 2.47. Güven ve veri teriminde kullanılan notasyonlar [122].

Güven terimi Şekil 2.47'deki P merkez noktadaki pikselin çevresindeki güvenilir bilginin bir ölçüsünü vermektedir ve $C(p)$ ile temsil edilmektedir. Hedef bölgenin dış kısmındaki pikseller daha büyük güvenlik değerleri içerirken hedef bölgenin merkezine yakın pikseller daha düşük güvenlik değerine sahiptir. Veri terimi ise P noktasındaki parlaklık gradyanı ile o noktada sınıra dik olan normal vektörün çarpımıyla hesaplanmaktadır. Veri terimi $D(p)$ ile gösterilir ve imgedeki doğrusal yapının kaynak bölgeden hedef bölgeye doğru yayılmasını sağlamaktadır. Şekil 2.47'deki gibi P merkezli yamaya öncelik değerleri, güven ve veri terimleri çarpılarak hesaplanır. Verilen $\Psi(p)$ yamasının başlangıç güven terimi (2.30)'daki gibi hesaplanır.

$$C(q) = \begin{cases} 1, & \forall q \in \phi \\ 0, & \forall q \in \Omega \end{cases} \quad (2.30)$$

Güven teriminin hesaplanması (2.31)'deki formül üzerinden hesaplanır.

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap (I-\Omega)} C(q)}{A(\Psi_p)} \quad (2.31)$$

Burada $A\Psi_p$, $\Psi(p)$ yamasının alanını ifade etmektedir.

Veri teriminin hesaplanması (2.32)'teki formül üzerinden hesaplanmaktadır.

$$D(p) = \frac{|\nabla^\perp I \cdot n_p|}{\alpha} \quad (2.32)$$

Burada α bir normalizasyon faktörüdür ve gri seviyeli imgeler için 255 değeri kullanılmaktadır. $\nabla^\perp I$ ise p noktasındaki doğrusal yapının yönünü gösteren vektördür. n_p , p noktasındaki $\delta\Omega$ 'nın sınırına dik olan birim vektörü ifade etmektedir.

Öncelik değeri (2.33)'teki formül üzerinden hesaplanmaktadır.

$$P(p) = C(p) \times D(p) \quad (2.33)$$

Kaynak bölgeden (ϕ) örnek alınacak yama için aramalar yapılır. Söz konusu arama (2.34)'teki formül üzerinden yapılır.

$$\Psi_q^\wedge = \arg \min_{\Psi(q) \in \Phi} d(\Psi_p^\wedge, \Psi_q) \quad (2.34)$$

Burada Ψ_q^\wedge değeri kaynak bölgeden kopyalanacak yamayı ifade etmektedir. Ψ_q doldurulacak bloğu ve Ψ_p^\wedge ise kaynak bölgeden alınan yüksek öncelikli yamayı (bloğu) temsil etmektedir. $d(\Psi_p^\wedge, \Psi_q)$ ifadesi iki blok arasındaki piksel farklarının karesel toplamı olarak tanımlanır. Örnek tabanlı içboyama yönteminde boşluklar doldurulmaya devam edildiği sürece öncelik değeri yeni değerler atanarak güncellenmektedir. Bu amaçla güven terimi, $\forall q \in \Psi_{\hat{p}} \cap \Omega$ için $C(q) = C(\hat{p})$ ataması yapılarak değiştirilir. Böylece ϕ kaynak bölgesinden Ω hedef bölgesine doğru yapılan kopyalamalarda hem yapı hem de doku yayılması sağlanmış olmaktadır [122].

Bu tez kapsamında örnek tabanlı içboyama yöntemi yeniden oluşturulmuş fresklere uygulanmıştır. Onarılan fresk ile yeniden oluşturulan fresk arasında olan değişimin değerlendirilmesinde ölçüt olarak Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR- Peak signal to noise ratio) kullanılmıştır. Bir görüntüde PSNR [131] değeri (2.35)'teki gibi hesaplanır.

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\text{Max}(I)}{\sqrt{MSE}} \quad (2.35)$$

Burada ele alınan gri seviyede bir görüntüde Max(I) değeri 255 olmaktadır. MSE ise ortalama karesel hatadır ve bir görüntünün kalitesinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [126]. MSE (2.36)'daki gibi hesaplanır.

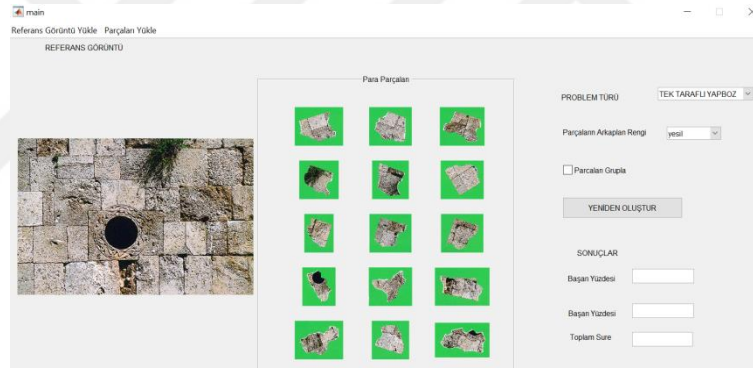
$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - f'(i, j))^2 \quad (2.36)$$

Burada f orijinal, f' ise sorgulanan görüntüdür.

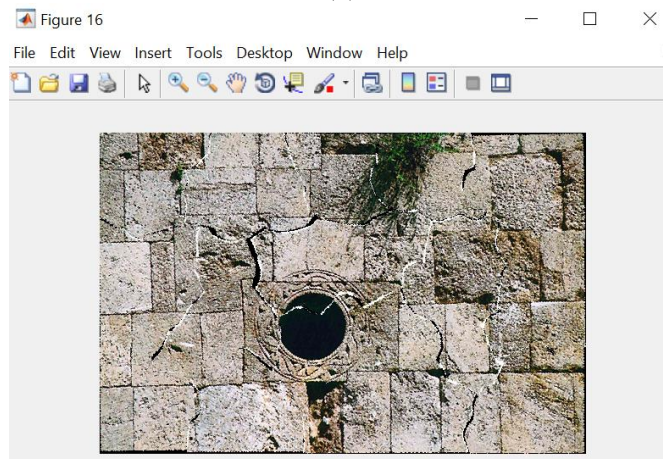
3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde parçalanmış nesnelerin bilgisayar destekli yeniden oluşturulmasında karşılaşılan problemlerin çözümlerinde elde edilen bulgular verilecektir. Yeniden oluşturma aşamalarında sonuçlar, literatürde bu konuda yapılan diğer çalışmalar ile kıyaslanarak önerilen bilgisayar destekli sistemin avantajları ve dezavantajlar verilecektir. Sonrasında yeniden oluşturma süreçlerinin hızlandırılması verilecek. En son kısımda ise yeniden oluşturma sonuçlarının ilgili oldukları alanlara göre yapılan değerlendirmeler sunulacaktır.

Bu tez kapsamında geliştirilen bilgisayar destekli sistemin görsel ara yüzü örnek olarak Şekil 3.1’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.1. (a) Geliştirilen bilgisayar destekli sistemin görsel arayüzü (b) bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulan bir nesnenin görüntüsü

Bilgisayar destekli sistemde kullanılan yöntemlerin büyük bir kısmı MATLAB ortamında yazılmıştır. Eşleştirme işleminde kullanılan anahtar nokta tabanlı yöntemler, C++ dili ile yazılmış ve OpenCV kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Yeniden oluşturulan nesnelerin onarılması için kullanılan içboya yöntemi, Microsoft Visual Studio 2017 yazılım geliştirme aracı ile C# progamlama dili kullanarak yazılmıştır.

3.1. Geliştirilen Bilgisayar Destekli Sistem ile Parçalanmış Nesnelerin Yeniden Oluşturulması

Parçalanmış nesnelerin önerilen bilgisayar destekli sistem ile yeniden oluşturulması aşamalar halinde verilmiştir.

3.1.1. Giriş Görüntülerinin (Parçaların) Yüklenmesi

Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında bu tez kapsamında oluşturulan veri setleri kullanılmıştır. Görüntü farklılığı, düşük doku özelliğine sahip parçaların eşleştirilmesi, tarayıcılardan kaynaklanan renk problemleri, parçalardaki tahribatlar vb. problem çözümünü zorlaştıran alt problemler ele alınmıştır.

3.1.2. Eşleştirme İşlemi

Eşleştirme işleminde elde edilen sonuçlar anahtar ve blok tabanlı iki farklı başlık altında verilmiştir.

(a) Eşleştirme İşleminde Kullanılacak Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemin Belirlenmesi

Bu çalışmada problem çözümünde karşılaşılan görüntü farklılığı problemi irdelenmiştir. Veri seti oluşturulmasında kullanılan banknotlar parçalanmadan önce dijital hale getirilmiştir. Böylece referans görüntü ile görüntü farklılığı olan banknotlar daha kolay bir şekilde seçilmiştir. Daha sonra seçilen banknotlar ile referans görüntüler ile SIFT, SURF, BRISK ve AKAZE yöntemleri kullanılarak birbirleriyle eşleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Anahtar Nokta Tabanlı Yöntemler Kullanılarak Banknotların Referans Görüntüleri ile Eşleştirilmesi

No	Banknotlar	# Eşleştirme işleminde doğruluk (precision) değeri (%)			
		SIFT	SURF	BRISK	AKAZE
1	5.000 TL Ön yüz (1990-1994)	69.56	81.81	96.87	89.47
2	5.000 TL Arka yüz (1990-1994)	86.27	81.48	85.18	100
3	50.000 TL Ön yüz (1989-1999)	83.13	64.42	89.43	85.53
4	50.000 TL Arka yüz (1989-1999)	85.00	65.08	89.12	97.47
5	100 TL Ön yüz (1983-1989)	75.11	75.00	87.50	90.39
6	100 TL Arka yüz (1983-1989)	94.61	74.35	97.18	81.98
7	250.000 TL Ön yüz (1992-2006)	81.75	94.37	91.23	94.69
8	250.000 TL Arka yüz (1992-2006)	84.44	80.00	72.85	78.18
9	10.000 TL Ön yüz (1982-1995)	76.27	84.76	90.54	93.41
10	10.000 TL Arka yüz (1982-1995)	85.87	76.27	86.66	83.84
11	10 TL Ön yüz (1979-1987)	86.21	87.04	93.72	100
12	10 TL Arka yüz (1979-1987)	93.27	89.87	95.97	88.37
13	20 TL Ön yüz (1966-1987)	88.89	86.36	95.83	90.91
14	20 TL Arka yüz (1966-1987)	92.91	75.00	95.45	95.74
15	100.000 TL Ön yüz (1991-2001)	82.14	89.39	84.18	97.15
16	100.000 TL Arka yüz (1991-2001)	78.24	73.81	87.85	94.34
17	1 Milyon TL Ön yüz (1995-2006)	80.97	62.50	79.92	90.10
18	1 Milyon TL Arka yüz (1995-2006)	90.00	82.18	86.75	96.50
19	5 TL Ön yüz (1968-1983)	83.12	97.50	85.92	91.89
20	5 TL Arka yüz (1968-1983)	82.16	94.74	97.53	99.31

Tablo 3.1.'de en yüksek doğruluk yüzdeleri vurgulanmıştır. Eşleştirme işleminin daha az bir sürede ve etkili bir şekilde yapılması için yöntemlerin kullandığı tanımlayıcılar, FLANN [132] yöntemi ile eşleştirilmiştir. Eşleştirme işleminde kullanılan eşik değeri 0.6 ve aykırı değerlerin elenmesinde RANSAC metodunda kullanılan eşik değer 3 olarak belirlenmiştir. Söz konusu eşik değerleri yapılan denemelerde banknotların eşleştirilmesi için uygun olduğu görülmüştür. Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi eşleştirme işleminde en başarılı yöntem net bir şekilde belirlenememiştir. Önerilen seçim stratejisi en başarılı yöntemi belirlemek için Tablo 3.1'deki doğruluk değerleri borda skorlarına dönüştürülmüştür. Tablo 3.2.'de eşleştirme işleminde elde edilen Borda skorları verilmiştir.

Tablo 3.2. Doğruluk yüzdelerinin borda yöntemine göre puanlanması

No	Banknotlar	# Yöntemlere ait Borda Skorları			
		SIFT	SURF	BRISK	AKAZE
1	5.000 TL Ön yüz (1990-1994)	0	1	3	2
2	5.000 TL Arka yüz (1990-1994)	2	0	1	3
3	50.000 TL Ön yüz (1989-1999)	1	0	3	2
4	50.000 TL Arka yüz (1989-1999)	1	0	2	3
5	100 TL Ön yüz (1983-1989)	1	0	2	3
6	100 TL Arka yüz (1983-1989)	2	0	3	1
7	250.000 TL Ön yüz (1992-2006)	0	2	1	3
8	250.000 TL Arka yüz (1992-2006)	3	2	0	1
9	10.000 TL Ön yüz (1982-1995)	0	1	2	3
10	10.000 TL Arka yüz (1982-1995)	2	0	3	1
11	10 TL Ön yüz (1979-1987)	0	1	2	3
12	10 TL Arka yüz (1979-1987)	2	1	3	0
13	20 TL Ön yüz (1966-1987)	1	0	3	2
14	20 TL Arka yüz (1966-1987)	1	0	2	3
15	100.000 TL Ön yüz (1991-2001)	0	2	1	3
16	100.000 TL Arka yüz (1991-2001)	1	0	2	3
17	1 Milyon TL Ön yüz (1995-2006)	2	0	1	3
18	1 Milyon TL Arka yüz (1995-2006)	2	0	1	3
19	5 TL Ön yüz (1968-1983)	0	3	1	2
20	5 TL Arka yüz (1968-1983)	0	1	2	3
# Borda skorlarının toplamı		21	14	38	47

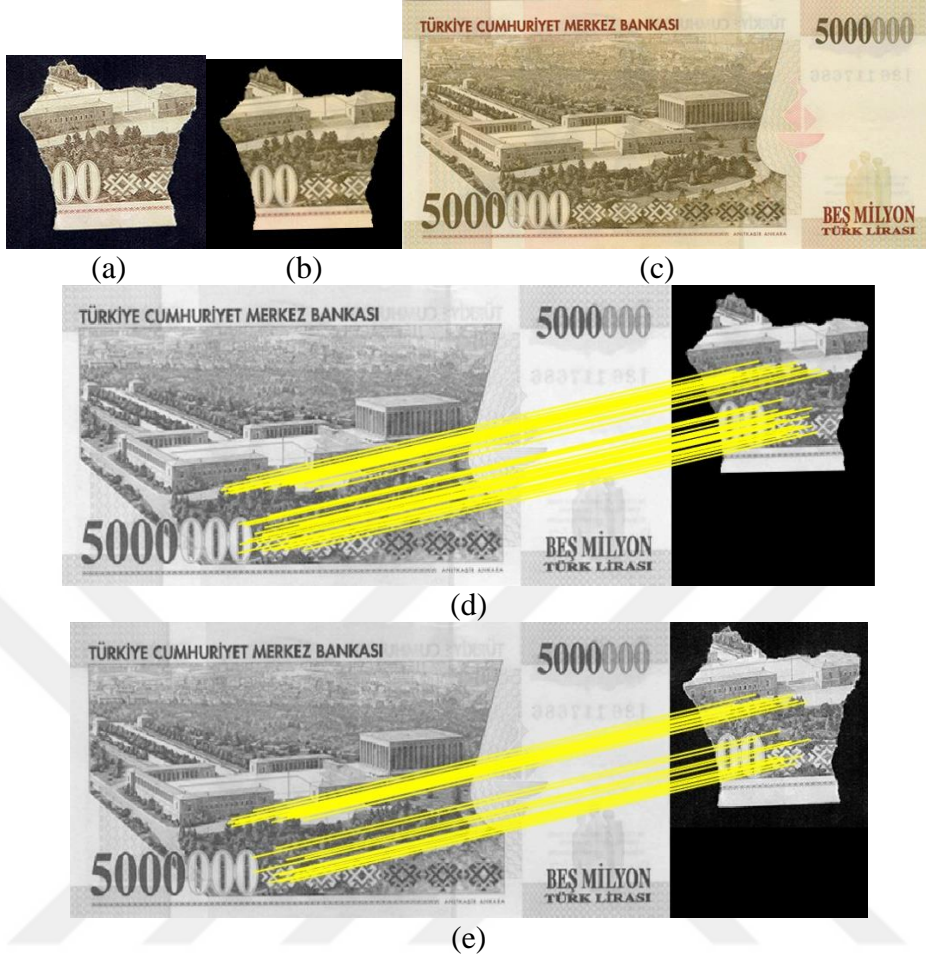
Tablo 3.2.'de en yüksek borda skorları vurgulanmıştır. Yarış BRISK ve AKAZE yöntemleri arasında geçmiştir. Yöntemlerin toplam Borda skorları hesaplandığında en yüksek Borda skorunu AKAZE yöntemi almıştır. Böylece parçalar ile referans görüntünün eşleştirmesinde kullanılacak yöntem kararlaştırılmıştır. Seçim stratejisi tarafından belirlenen bu kararın doğruluğunu tespit etmek için yukarıda verilen banknotlar elle parçalanmış ve banknot parçaları AKAZE yöntemi kullanılarak referans görüntüler ile eşleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. AKAZE yöntemi kullanılarak parçalar ile referans görüntülerin eşleştirilmesi

Banknotlar	Ön yüzü taratılan parçalar	Arka yüzü taratılan parçalar	TP (Doğru pozitif)	FP (Yanlış Pozitif)	Doğruluk oranı (%)
5.000 TL	2	4	6	0	100
50.000 TL	1	4	5	0	100
100 TL	3	3	6	0	100
250.000 TL	5	3	8	0	100
10.000 TL	4	4	8	0	100
10 TL	2	2	4	0	100
20 TL	3	1	4	0	100
100.000 TL	4	3	7	0	100
1 Milyon TL	3	2	5	0	100
5 TL	2	2	4	0	100

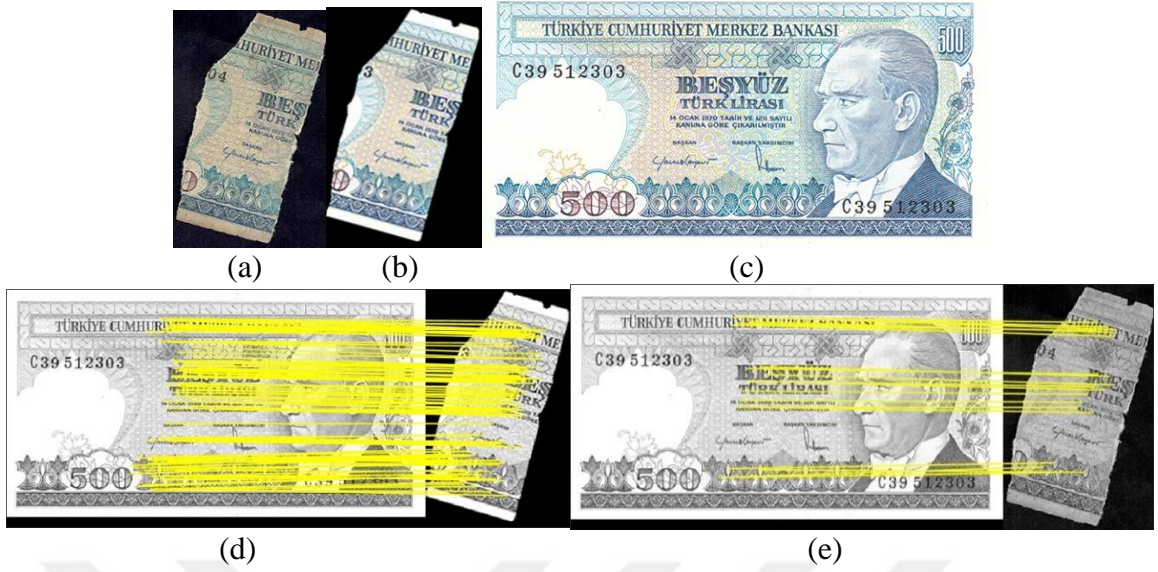
Tablo 3.3'te banknot parçalarının gerçekte taratılan yüzleri verilmiştir. AKAZE yöntemi ile eşleştirme işlemi yapılarak parçaların referans görüntüde ait oldukları yerler belirlenmeye çalışılmıştır. İsbetli tahminler TP ve hatalı tahminler FP etiketi ile gösterilmiştir. AKAZE yöntemi ile parçaların referans görüntülerde ait oldukları yerler yüksek doğruluk oranlarında ile tespit edilmiştir. Dolayısıyla Borda tabanlı önerilen seçim stratejisi tarafından yeniden oluşturma işleminde seçilen AKAZE yöntemi isabetli bir tercih olmuştur.

Görüntü farklılığının anahtar nokta tabanlı yöntemler üzerinde yaptığı olumsuz etki örnek olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. (a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın AKAZE yöntemi kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 3.2'deki sentetik parça, gerçek banknot parçasının şekil yapısına göre referans görüntüden kesilerek oluşturulan bir parçadır. Dolayısıyla parça ile referans görüntü arasında görüntü farklılığı yoktur. Sentetik bir parçada doğru eşleşen anahtar nokta sayısı 41 iken gerçek parçada bu sayı 25'e düşmüştür. Şekil 3.5'te ise yüzeyinde kirlenmeler olan bir parçanın referans görüntü ile eşleştirilmesi örnek olarak gösterilmiştir.

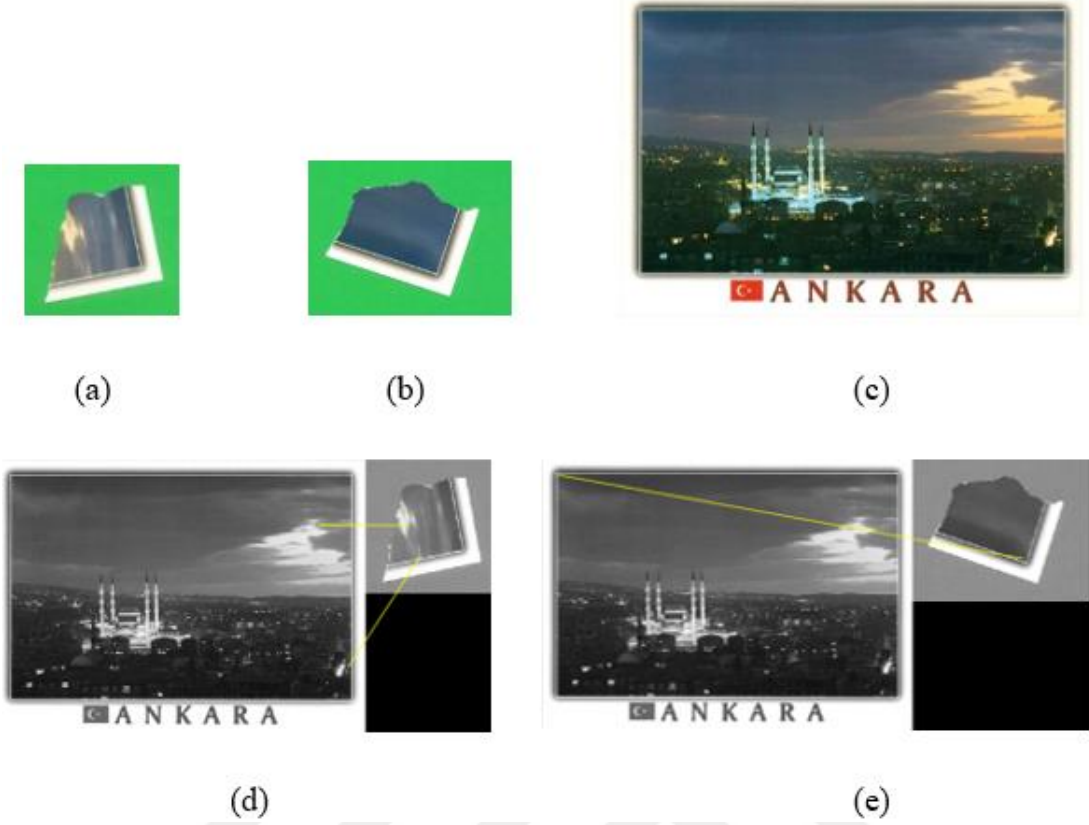


Şekil 3.3. (a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın AKAZE yöntemi kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 3.3'te sentetik bir parçada doğru eşleşen anahtar nokta sayısı 94 iken gerçek parçada bu sayı 21'e düşmüştür. Bu çalışmada görüntü farklılığı genel olarak ele alınmıştır. Günlük hayatta banknotlar çok sık el değiştirdiğinden dolayı yüzeylerinde tozlanma, kırışma, mekanik, termal ve kimyasal vb. olmak üzere birçok bozulma türü olmaktadır [105]. Literatürde her bir bozulma türünü ve bunların oranlarını saptayan ölçütlere rastlanmamıştır. Dolayısıyla hangi tür bozulmanın eşleştirme işlemi hangi oranda olumsuz etkilediğinin ortaya konulması başlıca bir araştırma konusu olacaktır.

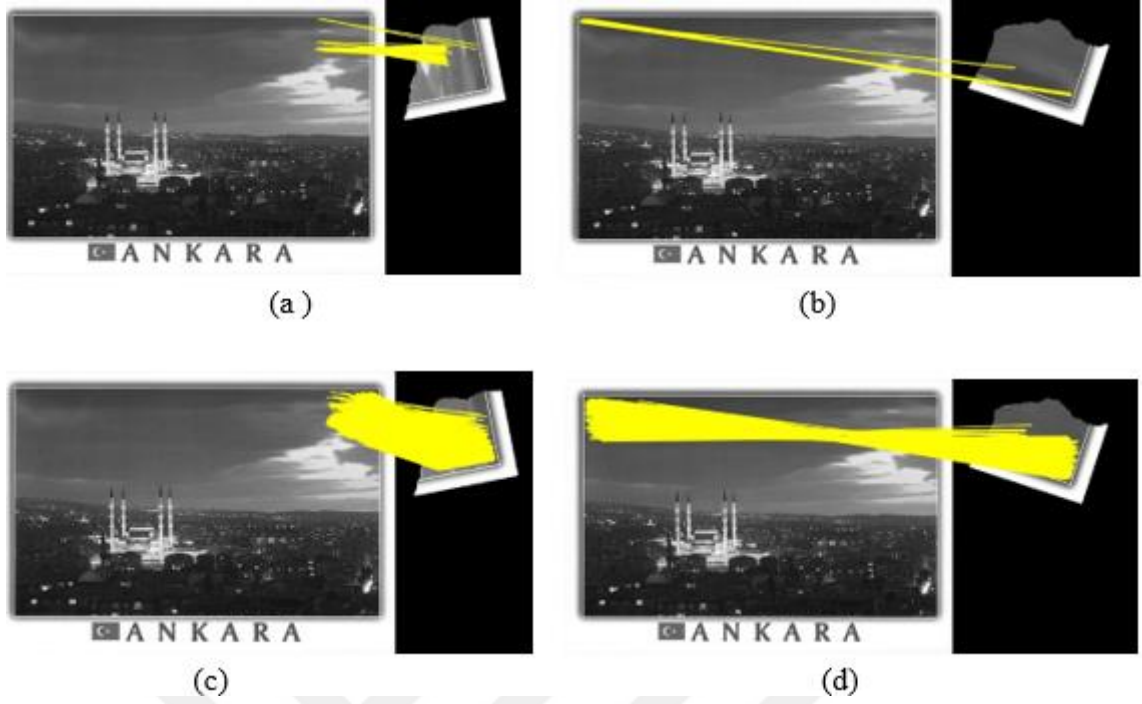
(b) Blok tabanlı eşleştirme işleminde kullanılacak yöntemin belirlenmesi

Bu çalışmada anahtar nokta tabanlı yöntemlerin düşük doku özelliği veya tek düze/düz (flat, smooth) görüntü özelliklerine sahip parça görüntülerinin referans görüntüler ile eşleştirilmesinde etkisiz kaldığı tespit edilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.4'te düşük doku özelliği olan parçaların referans görüntü ile eşleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. (a) ve (b) Düşük doku özelliğine sahip parçalar (c) referans görüntü (d) ve (e) AKAZE yöntemi ile parçaların eşleştirilmesi

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi gök yüzü görüntüsü içeren parçalarda 1 ve 2 tane doğru eşleşen anahtar noktalar tespit edilmiştir. Dolayısıyla AKAZE yöntemi söz konusu parçaların referans görüntüler ile eşleştirilmesinde etkisiz kalmıştır. Eşleştirme işleminin güçlendirilmesi için AKAZE yönteminin etkisiz kaldığı durumlarda parçalar, blok tabanlı yöntem kullanılarak referans görüntü ile eşleştirilmektedir. Bu çalışmada blok tabanlı eşleştirme işleminde referans görüntü ve parçaların alt bloklara ayrılmasında ideal blok boyutu 64x64 olduğu tespit edilmiştir. Hu ve Zernike momentleri karşılaştırılarak blok tabanlı eşleştirme yönteminde kullanılacak metoda karar verilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.4.'te verilen parçalar, Hu ve Zernike momentler kullanılarak eşleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.

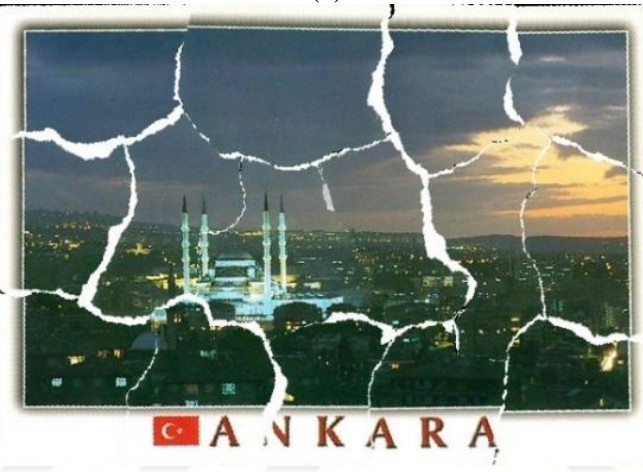


Şekil 3.5. (a) ve (b) Hu moment (c) ve (d) Zernike moment kullanılarak parçaların referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi Zernike moment ile yapılan doğru eşleşme sayısı Hu momente göre daha fazla çıkmıştır. Zernike momentte yineleme sayısı 7 olarak seçilmiştir. Yalnızca blok tabanlı yöntem ile kullanılarak problem çözümü gerçekleştirilebilmektedir. Söz konusu problem, Hu ve Zernike momentler kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.6'da verilmiştir.



(a)

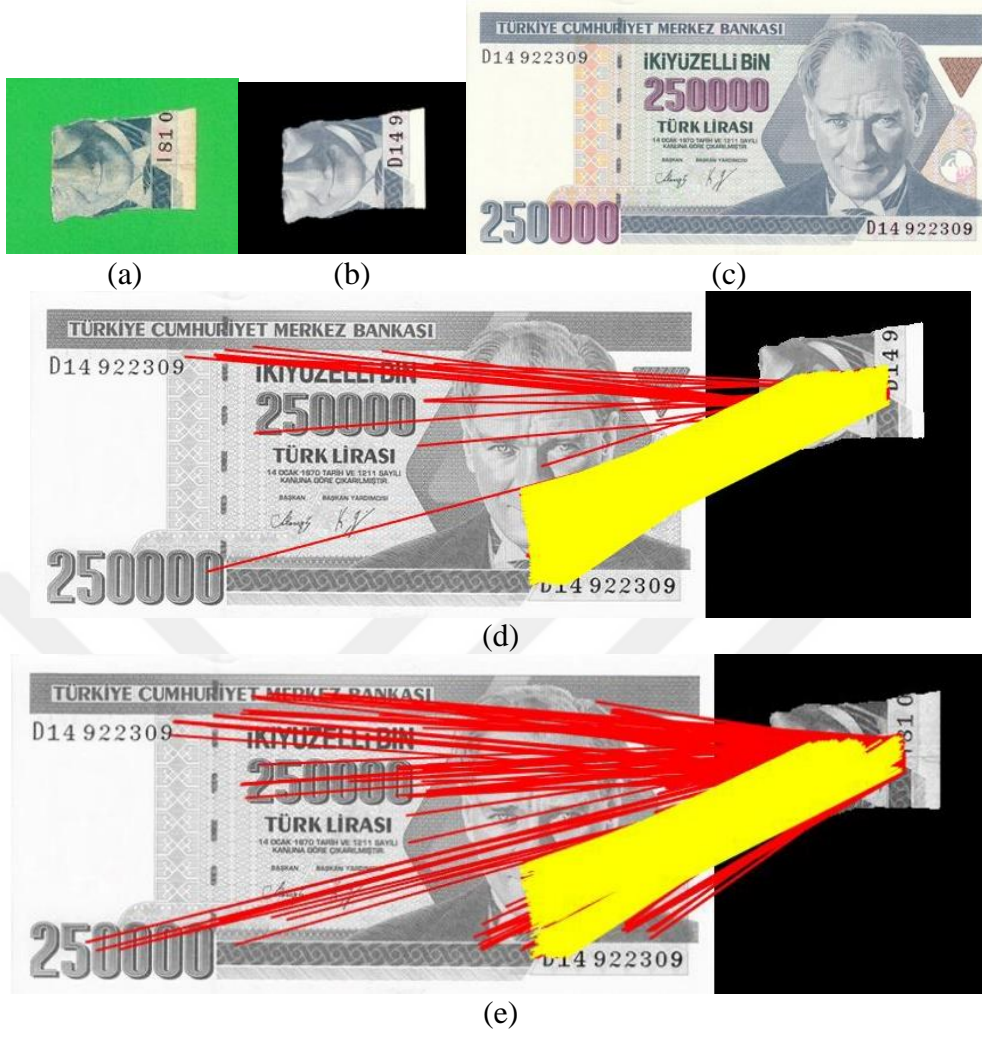


(b)

Şekil 3.6. (a) Hu (b) Zernike moment kullanılarak yapılan blok tabanlı yeniden oluşturma işlemleri

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi Hu moment kullanılarak problem çözümü gerçekleştirilemezken; Zernike moment kullanarak söz konusu problem başarılı bir şekilde çözülmüştür. Bu çalışmada yapılan denemelerde Zernike momentler Hu momentlere göre daha başarılı sonuç vermiştir. Bu nedenle çalışmada blok tabanlı yapılan eşleştirme işlemlerinde Zernike momentler kullanılmıştır.

Görüntü farklılığının blok tabanlı yöntemler üzerinde yaptığı olumsuz etki örnek olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. (a) Gerçek (b) sentetik parça (c) referans görüntü (d) sentetik (e) gerçek parçanın Zernike moment tabanlı yöntem kullanarak referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 3.7. d’de görüldüğü gibi görüntü farklılığı olmayan sentetik bir parçada doğru eşleşme oranı daha fazladır. Şekil 3.7.e’de görüntü farklılığından dolayı eşleşme de isabet oranı azalmıştır. Görüntü farklılığından kaynaklanan olumsuz etkinin azaltılması için Zernike momente seçilen yineleme sayısı 7’den 15’e çıkarılmıştır. Şekil 3.7’deki parçanın eşleştirilmesi yeniden yapılmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 3.8’de verilmiştir.

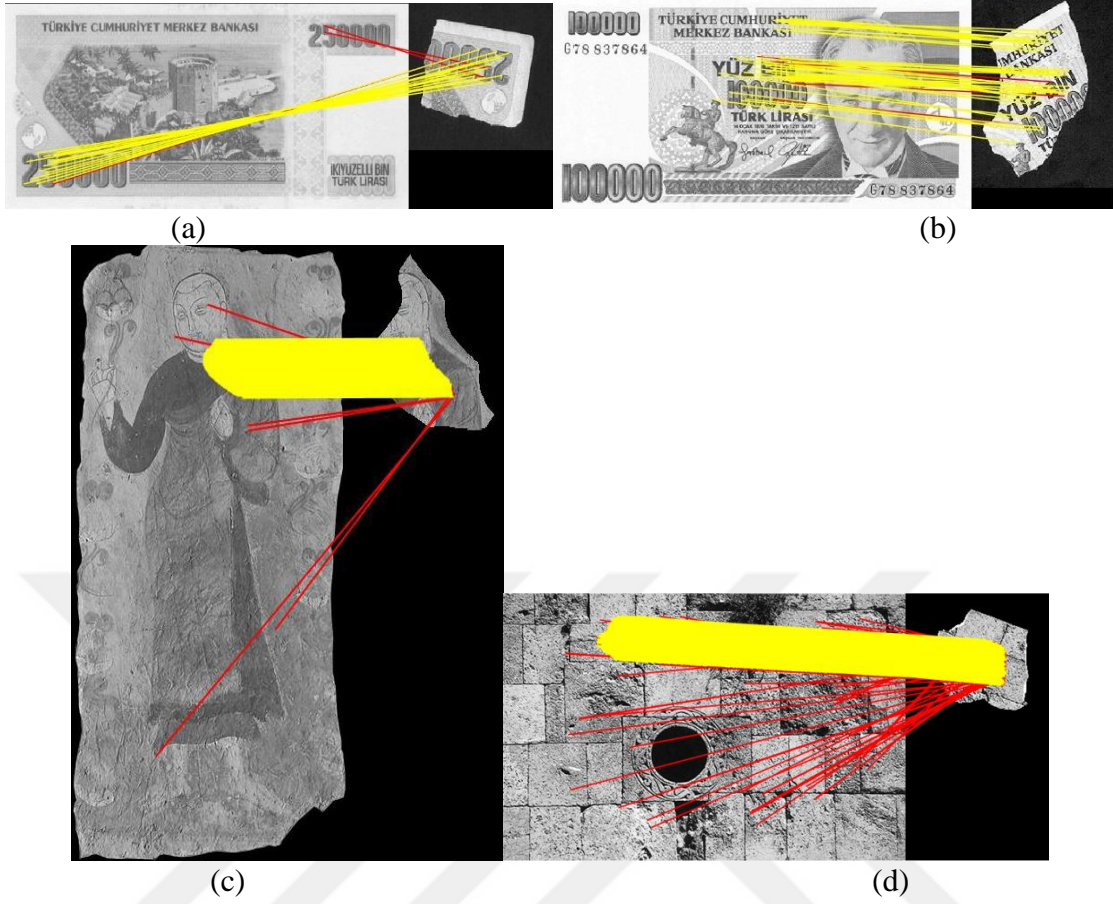


Şekil 3.8. Zernike momentte yineleme sayısı 15 yapılarak bir parçanın referans görüntü ile eşleştirilmesi

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi görüntü farklılığının fazla olduğu problemlerde Zernike momentte yineleme sayısı artırılarak eşleştirme sonuçlarında iyileşmeler olmuştur.

3.1.3. Global Tutarlılığın Sağlanması

Parçaların referans görüntü ile eşleştirildiğinde hatalı eşleşmeler RANSAC yöntemi ile elenerek problem çözümünde global tutarlılık sağlanmıştır. Şekil 3.9’da anahtar nokta ve blok tabanlı yöntemler ile yapılan eşleşmelerde hatalı sonuçların elenmesi ile ilgili bazı sonuçlar verilmiştir.



Şekil 3.9. Hatalı eşleşmelerin elenmesi (a) ve (b) AKAZE yöntemi ile anahtar nokta tabanlı (c) ve (d) Zernike moment ile blok tabanlı elde edilen sonuçlar

Şekil 3.9’da hatalı eşleşmeler kırmızı, doğru eşleşmeler ise sarı renkte gösterilmiştir. Şekil 3.9.a ve b’de AKAZE yöntemi tarafından elde edilen hatalı eşleşen anahtar noktalar elenerek söz konusu parçaların referans görüntüdeki yerleri başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Şekil 3.9.c ve d’de Zernike moment ile yapılan blok tabanlı eşleşmedeki hatalı eşleşen bloklar elenmiştir.

3.1.4. Çıkış Görüntülerinin Elde Edilmesi (Parçaların Bir Araya Getirilmesi)

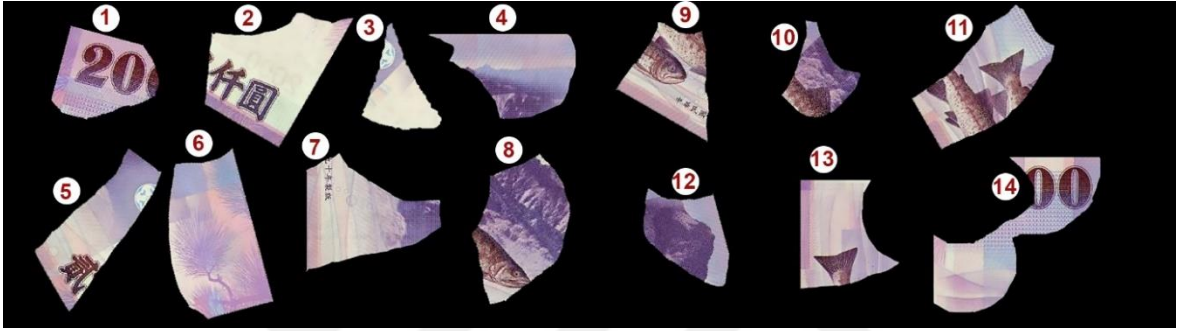
Hatalı eşleşen sonuçlar elendikten sonra parçalar boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilmiştir. Bu kısımda elde edilen sonuçlar üç başlık halinde verilmiştir. İlk etapta parçaların hizalanması için geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Diğer kısımda hizalanan parçalar nesnedeki ait oldukları konumlara göre boş çerçeveye

yerleştirilme sonuçları gösterilmiştir. Son kısımda ise çoklu yeniden oluşturma işleminde elde edilen sonuçlar verilmiştir.

1. Parçaların hizalanması (Parçaların rotasyon açısı tahmini)

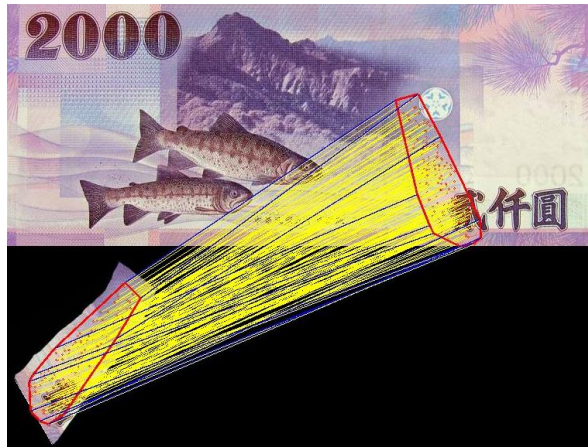
Bu kısımda anahtar nokta tabanlı yöntemlerde parçaların rotasyon açısını hesaplayan yöntemden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Önerilen yöntem ile Gwo ve ark. [77] tarafından geliştirilen rotasyon açısı tahmin yöntemi karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.10'da rotasyona uğratılmış 2000 Yuan'a ait sentetik parçalar gösterilmiştir.



Şekil 3.10. 2000 Yuan'a ait sentetik parçalar

Şekil 3.10'daki sentetik parçalar, Gwo ve ark. [77] tarafından yapılan çalışmada kullanılmıştır. Örnek olarak 5 nolu sentetik parça için minimum kapalı çevrimlerin bulunması ve bunun sonucunda oluşan geometrik şekillerin karşılaştırılması Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. 5 nolu parçanın rotasyon açısının hesaplanması için geometrik şekillerin karşılaştırılması

Şekil 3.11’de AKAZE yöntemi ile doğru eşleşen anahtar noktalar sarı çizgiler ile temsil edilmiştir. Mavi çizgiler ise kapalı çevrimlerdeki eşleşen köşe noktaları göstermektedir. Parça ve referans görüntüdeki anahtar noktaları kapsayan minimum kapalı çevrimlerin bulunması ile oluşan geometrik şekiller kırmızı renkte gösterilmiştir. Geometrik şekillerin karşılaştırılmasından faydalanarak geliştirilen rotasyon açı tahmin algoritmasıyla 5 nolu parçanın döndürülme açısı 75.260° olarak hesaplanmıştır. 2000’yuana ait tüm parçaların rotasyon açı tahmin sonuçları, Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen rotasyon açı tahmin metodu kullanarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin karşılaştırılması Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. 2000 Yuan’a ait parçaların rotasyon açı tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Parça No	Gerçek Rotasyon Açısı(θ)	Önerilen yöntem		Gwo ve ark. [77] tarafından geliştirilen yöntem	
		Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $	Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $
1	15°	15.160°	0.160°	14.788°	0.212°
2	30°	29.915°	0.085°	30.041°	0.041°
3	45°	44.956°	0.044°	45.236°	0.236°
4	60°	59.879°	0.121°	59.686°	0.314°
5	75°	75.260°	0.260°	75.039°	0.039°
6	90°	90.000°	0.000°	90.00°	0.000°
7	0°	0.000°	0.000°	0.0000°	0.000°
8	15°	15.004°	0.004°	14.999°	0.001°
9	30°	29.959°	0.041°	30.170°	0.17°
10	45°	45.297°	0.297°	45.225°	0.225°
11	60°	60.222°	0.222°	60.117°	0.117°
12	75°	75.246°	0.246°	74.611°	0.389°
13	90°	89.937	0.063	90.000	0.000
14	0°	0.000	0.000	0.000	0.00
Ortalama			0.11021°		0.12457°

Tablo 3.4’te ortalama hata paylarına bakıldığında önerilen yöntem, Gwo ve ark. [77] geliştirilen yöntemle göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Gwo ve ark. [77] tarafından geliştirilen yöntem, bir parçanın rotasyon açı tahminini dar açılar için (0-90) hesaplayabilmiştir. Parçalar geniş açı (90-360) ile rotasyona uğratıldığında bu yöntem etkisiz kalmaktadır. Tablo 3.5’te geniş açılar ile döndürülen parçaların rotasyon açı tahminleri verilmiştir.

Tablo 3.5. 2000 Yuan'a geniş açı ile döndürülen bazı parçaların açı rotasyon tahmin sonuçları

Parça No	Gerçek Rotasyon Açısı (θ)	Önerilen yöntem		Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen yöntem	
		Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $	Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $
2	253°	252.810°	0.190°	72.973°	180.027°
8	150°	150.647°	0.647°	-30.57°	180.572°
9	180°	180.172°	0.172°	-0.065°	180.065°
10	185°	185.160°	0.160°	5.170°	179.83°
11	197°	197.367°	0.367°	16.903°	180.097°
12	105°	105.437°	0.437°	-75.363°	180.363°
Ortalama			0.329°		180.159°

Tablo 3.5'te önerilen yöntem ile parçaların rotasyon açı tahminleri ortalama 0.329° derecelik hata ile tespit edilmiştir. Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen yöntemde ise söz konusu parçaların rotasyon açıları 180.159° derecelik ortalama hata ile tahmin edilmiştir. Bu hata payı kabul edilecek seviyede değildir. Söz konusu yöntemde ayrıca bir parçanın saat yönünde mi yoksa tersi yönde mi döndürüleceği tespit edilememektedir. Yalnızca rotasyon açı değeri hesaplanabilmektedir. Gerçek banknot parçaları, taratılıp bilgisayar ortamına aktarılırken farklı yönlerde herhangi bir açı (0°-360°) ile rotasyona uğrayabilir. Bu nedenle problem gerçek boyuta taşındığında Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen yöntem etkisiz kalmaktadır. Örnek olarak bu tez kapsamında oluşturulan gerçek verisetinde 1 YTL'lik banknota ait parçaları Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. 1 YTL'ye ait gerçek banknot parçaları

Şekil 3.12’de gösterilen banknot parçalarının rotasyon açısı tahmin sonuçları Tablo 3.6.’da verilmiştir.

Tablo 3.6. 1 YTL’ye ait gerçek parçalar için rotasyon açısı tahmin sonuçları

Parça No	Dönüş Yönü	Gerçek Rotasyon Açısı (θ)	Önerilen Yöntem			Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen yöntem		
			Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $	Yön	Tahmini açı değeri (θ_e)	Fark (Sapma) $ \theta - \theta_e $	Dönüş yönü
1	cw	14.607°	16.237°	1.630°	cw	15.744°	1.138°	-
2	ccw	95.976°	95.376°	0.600°	ccw	84.001°	11.975°	-
3	ccw	126.6458°	127.065°	0.420°	ccw	53.250°	73.395°	-
4	cw	29.0098°	29.719°	0.710°	cw	28.541°	0.469°	-
5	cw	25.8565°	26.576°	0.720°	cw	26.014°	0.158°	-
6	ccw	91.8888°	92.988°	1.100°	ccw	87.623°	4.265°	-
Ortalama				0.863			15.233	

Tablo 3.6’da cw saat yönü, ccw ise saat yönünün tersi yönde döndürülmeyi ifade etmektedir. Tablo 3.6’da parçaların rotasyon açısı tahminlerinde ortalama hata paylarına bakıldığında çalışmada geliştirilen yöntem daha başarılı çıkmıştır. Bununla birlikte önerilen yöntem ile parçaların uğratıldıkları rotasyon açısı değerlerinin yanında döndürüldükleri yönlerde belirlenmiştir. Gwo ve ark. [77] tarafından önerilen yöntemde ise parçaların hangi yönde döndürülmesi gerektiği tespit edilememiştir. Ayrıca 2,3 ve 6 nolu parçaların dönüş yönü doğru belirlenmiş olsa bile bulunan rotasyon açısı sonuçları oldukça hatalıdır. Örneğin 3 nolu parça, saat yönü veya tersi yönde; 53.2508° derecelik açı ile döndürülse bile söz konusu parça yine hatalı hizalanmış olacaktır. Parçaların hizalanmasında dönüş yönünün tespit edilmesi önemlidir. Çünkü rotasyon işleminde parça sayısı n ile ifade edecek olursa; her bir parçanın dönüş yönü hesaba katıldığında 2^n olasılık ortaya çıkmaktadır.

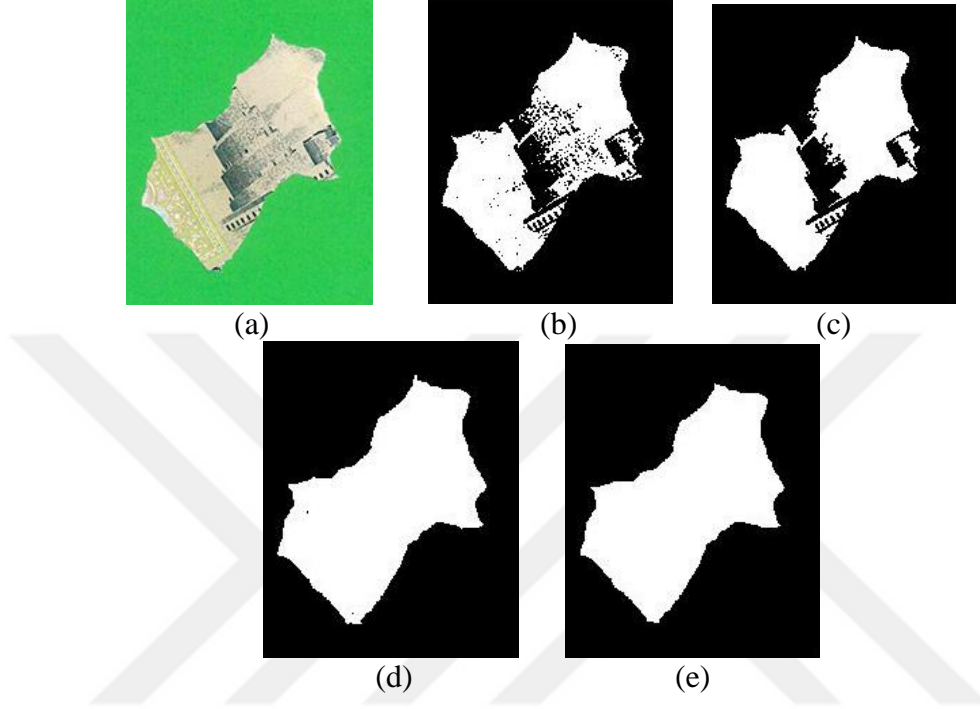
2. Parçaların boş bir çerçeveye yerleştirilmesi

Bu kısım iki alt başlığa ayrılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. İlk kısımda parçalara ait piksellerin belirlenmesinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Diğer aşamada ise parçaların boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilme sonuçları gösterilmiştir.

(a) Parçalara ait piksellerin belirlenmesi

Literatürde daha önceki çalışmalarda [36, 61] parça görüntülerinin ikiye bölütlenmesi Otsu yönteminden faydalanılmıştır. Parçalara ait piksellerin belirlenmesi için

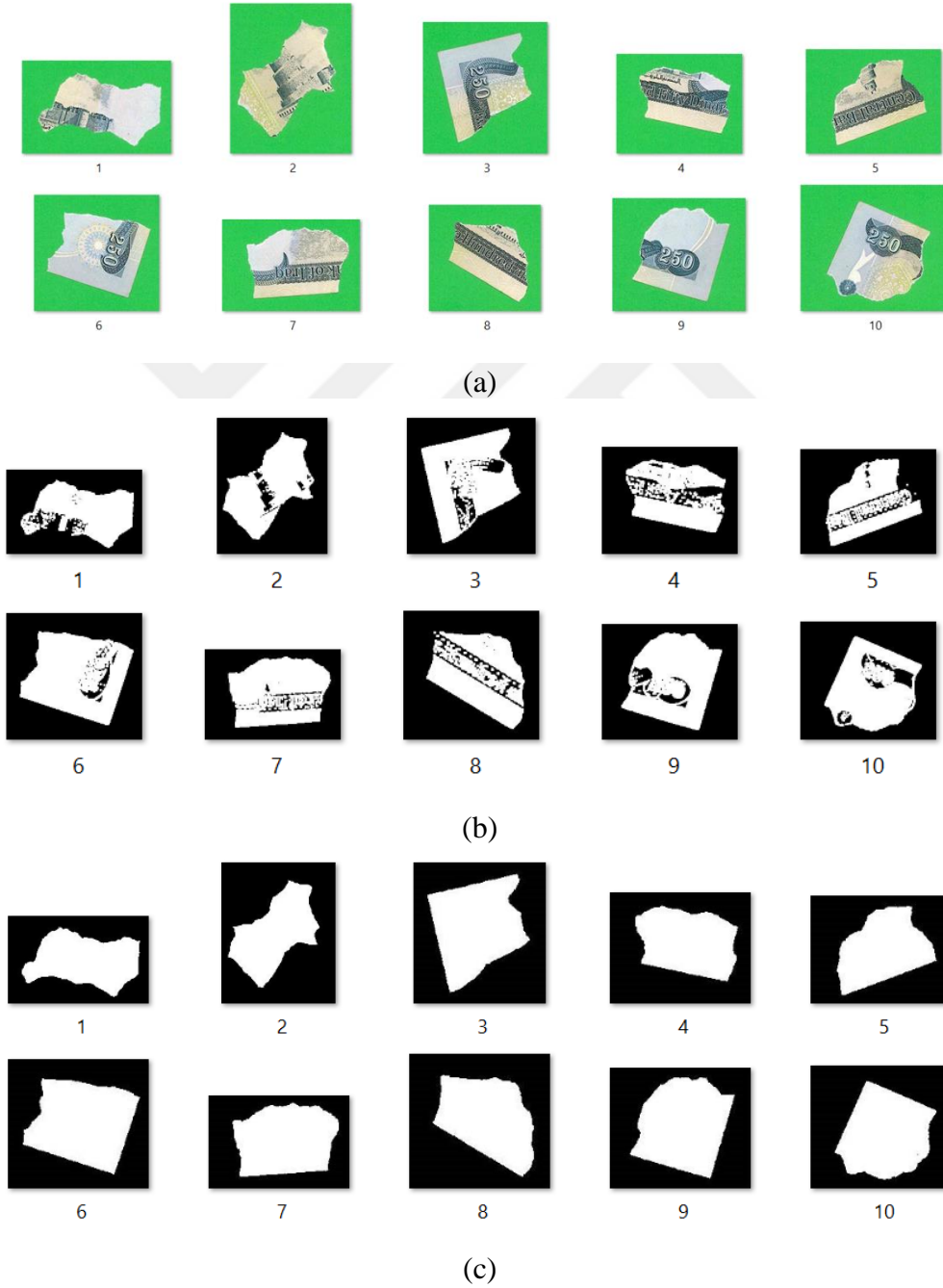
Otsu yöntemi [113, 133] kullanılarak parçalar ikiye bölütlenmiştir. Önerilen CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile Otsu yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Örnek olarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. (a) Bir banknot parçası (b) Otsu yöntemi ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi bölütlenmesi (c) boşlukların doldurulması ve gürültülerin giderilmesi (d) önerilen yöntem ile parçanın ikili seviyeye dönüştürülmesi (e) boşlukların doldurulması ve gürültülerin giderilmesi

Şekil 3.13.a'da verilen görüntü ilk etapta otsu yöntem ile ikili seviye dönüştürülmüştür. Şekil 3.13.b'de Otsu yöntemi ile elde edilen görüntüde oluşan boşlukların doldurulması için bu çalışmada kullanılan rekonstrüksiyon tabanlı boşluk doldurma yöntemi [120] kullanılmıştır. Daha sonra söz konusu görüntüye bu çalışmadaki gibi gürültülü piksellerin ortadan kaldırılması için 3x3 lük aşınma operatörü uygulanmıştır. Şekil 3.13.c'de görüldüğü gibi parçaya ait pikseller başarılı bir şekilde belirlenememiştir. Şekil 3.13.d'de parça görüntüsü CIELab renk uzayı ile ikili seviyeye dönüştürülmüştür. Otsu yönteminde göre daha az boşluklar elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen görüntüye rekonstrüksiyon tabanlı boşluk doldurma yöntemi ve 3x3 lük aşınma operatörü uygulanmıştır. Şekil 3.13.d'de görüldüğü gibi daha başarılı sonuç elde edilmiştir. Bu çalışmada yapılan incelemelerde yeşil arkaplan kullanılan parça görüntülerinde arkaplana

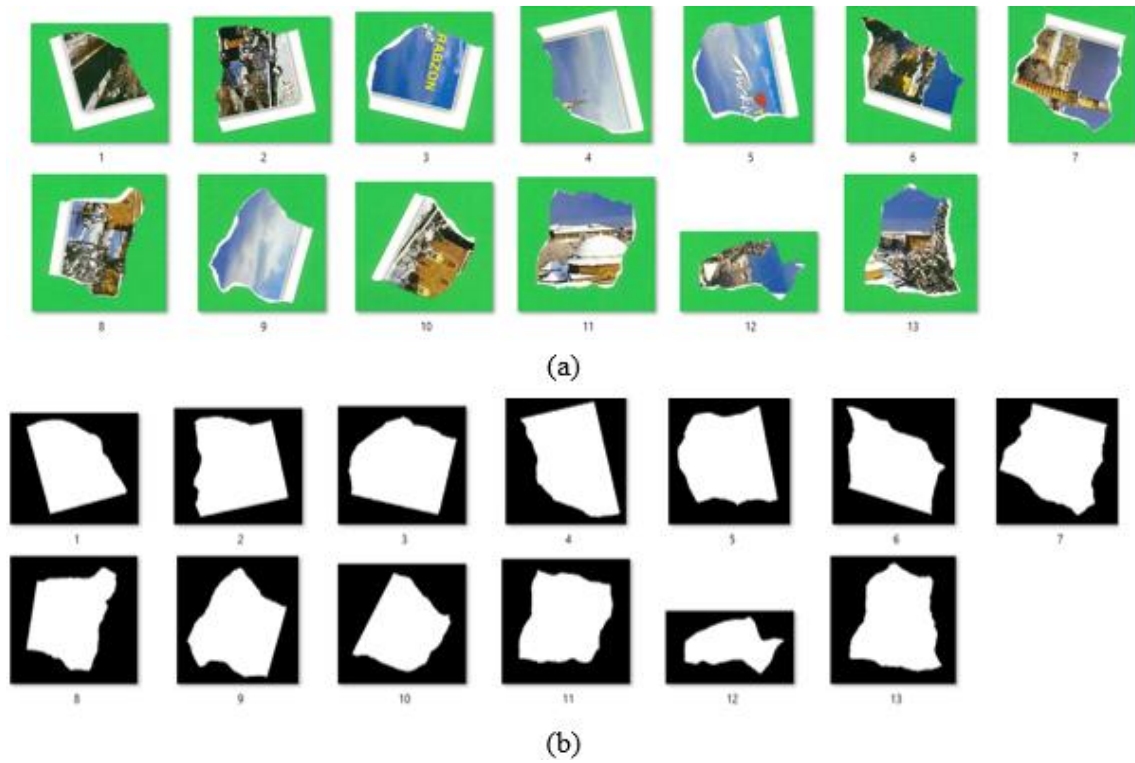
ait piksellerin a bileşen değeri, -75 ile -30 arasında olduğu saptanmıştır. Siyah arkaplan kullanılan parça görüntülerinde ise arkaplana ait piksellerin L bileşeni 30'dan küçük değerler aldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada parçalara ait piksellerin belirlenmesinde söz konusu eşik değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.13'te verilen parçanın ait olduğu banknottaki diğer parçalara ait piksellerin belirlenme sürecindeki nihai sonuçlar Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. a) Bir banknota ait parçalar (b) Otsu tabanlı yaklaşım ile elde edilen sonuçlar (c) önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçlar

Şekil 3.14'te görüldüğü gibi önerilen yaklaşım, Otsu tabanlı yaklaşıma göre parçalara ait pikselleri daha başarılı bir şekilde tespit etmiştir.

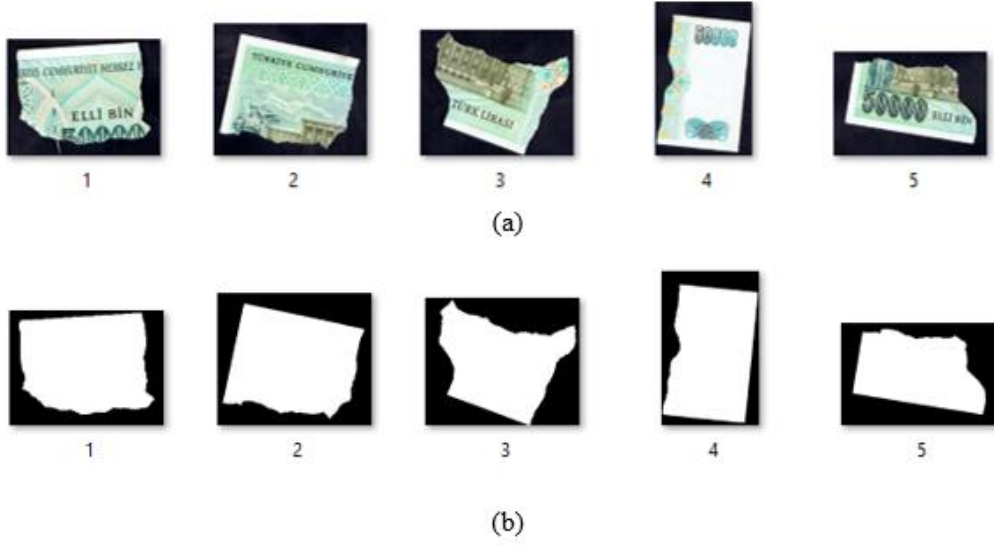
Önerilen yaklaşım ile farklı tarayıcılardan elde edilen parçalar, başarılı bir şekilde ikili seviyeye dönüştürülerek parçalara ait pikseller başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Bu tez kapsamında değişik tarayıcılar kullanılarak oluşturulan veri setleri ve diğer çalışmalarda [31, 55, 73] kullanılan bdw082010 veri seti üzerinde elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.15. (a) Bir kartpostala ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile tespit edilmesi

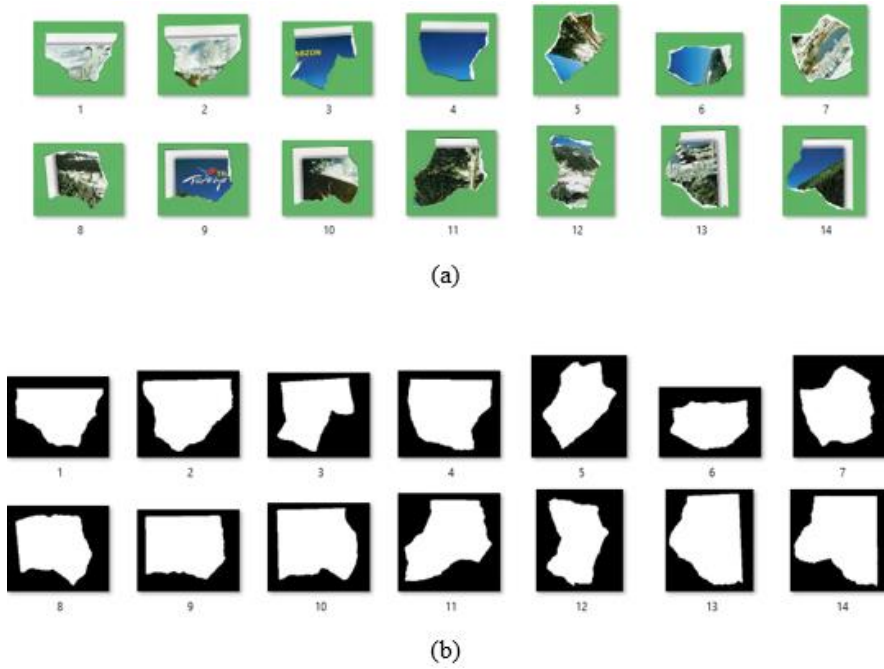
Şekil 3.15. a'da kartpostala ait parçalar Kyocera UTAX 5555i markalı bir tarayıcı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Parçalara ait pikseller, CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım ile Şekil 3.15. b'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

Şekil 3.16'da ise Brother dcp-j105 markalı tarayıcı ile bilgisayar ortamına aktarılan bir banknota ait parçaların CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım ile ikili seviyeye dönüştürülme sonuçları verilmiştir.



Şekil 3.16. (a) Bir banknota ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile tespit edilmesi

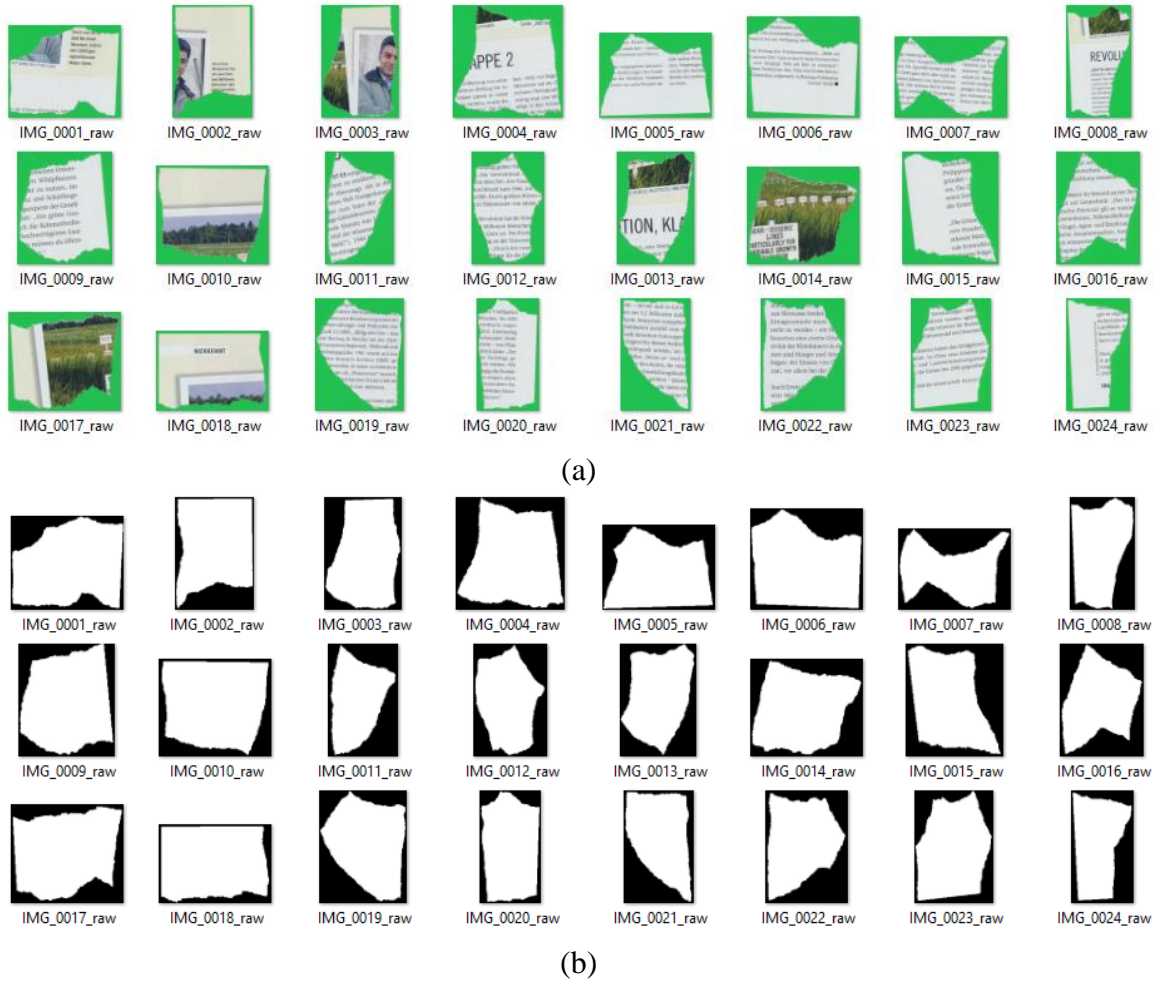
Şekil 3.16’da görüldüğü gibi bir banknota ait parçalar başarılı bir şekilde ikili seviyeye dönüştürülmüştür. Şekil 3.17’de Epson Perfection V19 markalı tarayıcı ile bilgisayar ortamına aktarılan parçalara ait piksellerin belirlenmesinde elde edilen bir sonuç gösterilmiştir.



Şekil 3.17. (a) Bir karpostala ait parçalar (b) parçalara ait piksellerin CIELab uzayı tabanlı yaklaşım ile tespit edilmesi

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi bir banknota ait parçalar başarılı bir şekilde ikili seviyeye dönüştürülmüştür.

Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım bu tez kapsamında değişik tarayıcılar kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılan nesne parçalarında başarılı sonuç vermiştir. Bununla birlikte parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulma sürecinde referans görüntü kullanmayan bilgisayar destekli sistemlerde [31, 55, 73] kullanılan bdw082010 veri seti üzerinde önerilen yaklaşım test edilmiştir. Şekil 3.18’de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

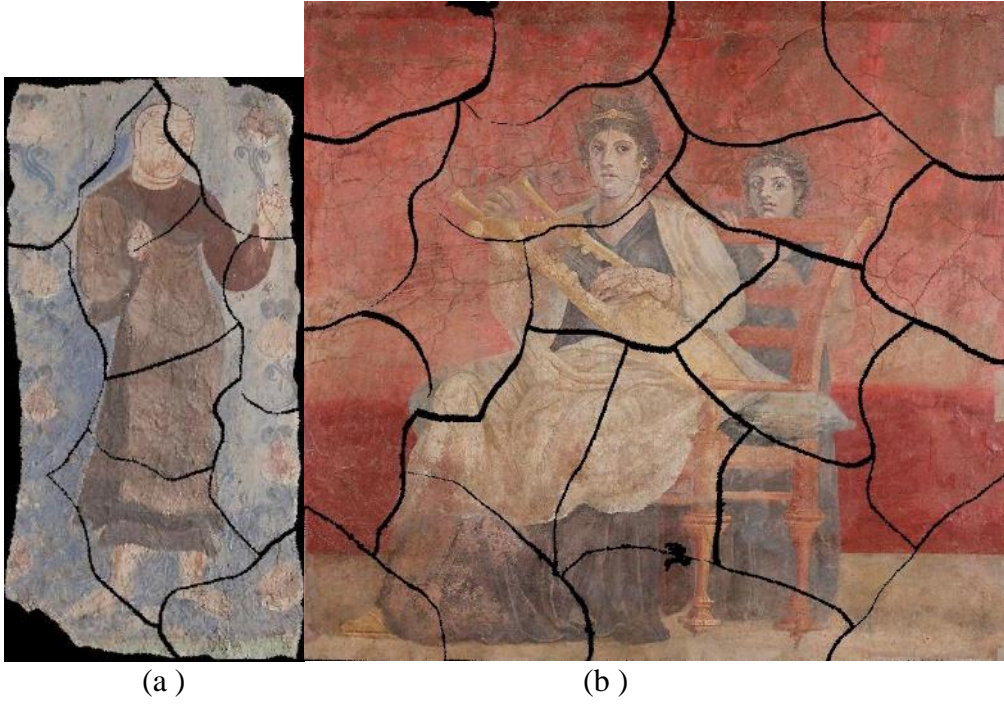


Şekil 3.18. (a) Bir magazin sayfasına ait parçalar (b) parça görüntülerinin ikili seviyeye dönüştürülmesi

Şekil 3.18a.'da verilen bdw082010 verisetinde ait parçalar, Canon CanoScan 9000F markalı tarayıcı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 3.18.b'de görüldüğü gibi önerilen yaklaşım ile parçalara ait pikseller başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

(b) Yerleştirme sürecinin tamamlanması

Geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile parçalanmış fresklerin yeniden oluşturulma sonuçları örnek olarak Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. (a) ve (b) Parçalanmış fresklerin yeniden oluşturulma sonuçları

Parçalanmış biletlerin yeniden oluşturma sonuçları ile ilgili birkaç örnek Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



(a)



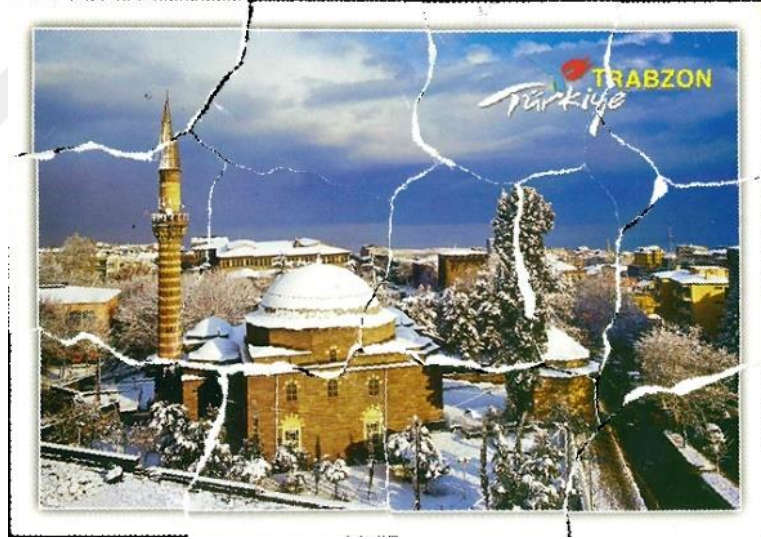
(b)

Şekil 3.20. Parçalanmış biletlerin yeniden oluşturulması

Parçalanmış kartpostalların yeniden oluşturma sonuçları ile ilgili birkaç örnek Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.21. Parçalanmış kartpostalların yeniden oluşturulması

Parçalanmış fotoğrafların yeniden oluşturma sonuçları ile ilgili birkaç örnek Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



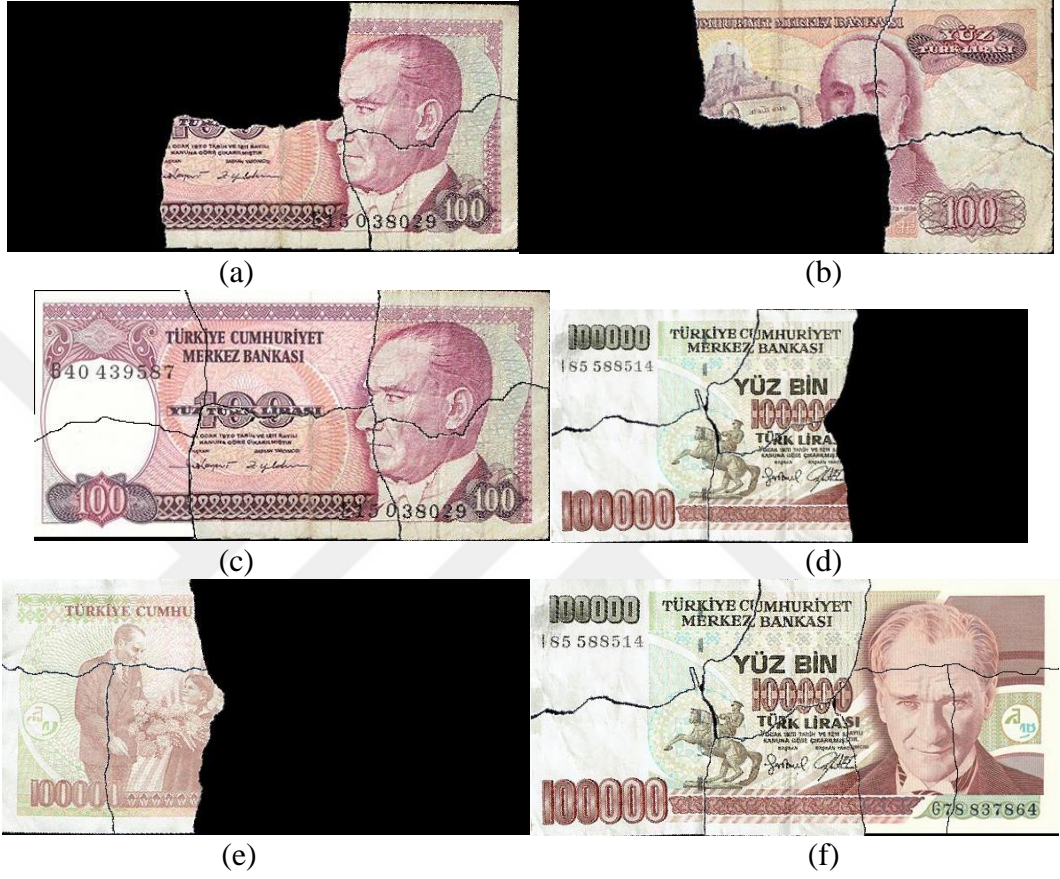
(a)



(b)

Şekil 3.22. Parçalanmış fotoğrafların yeninden oluşturulma sonuçları

Çift taraflı yapboz probleminde çerçeveye yerleştirme işlemi önerilen yaklaşım ile başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Parçalanmış banknot ile ilgili elde edilen sonuçlar örnek olarak Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

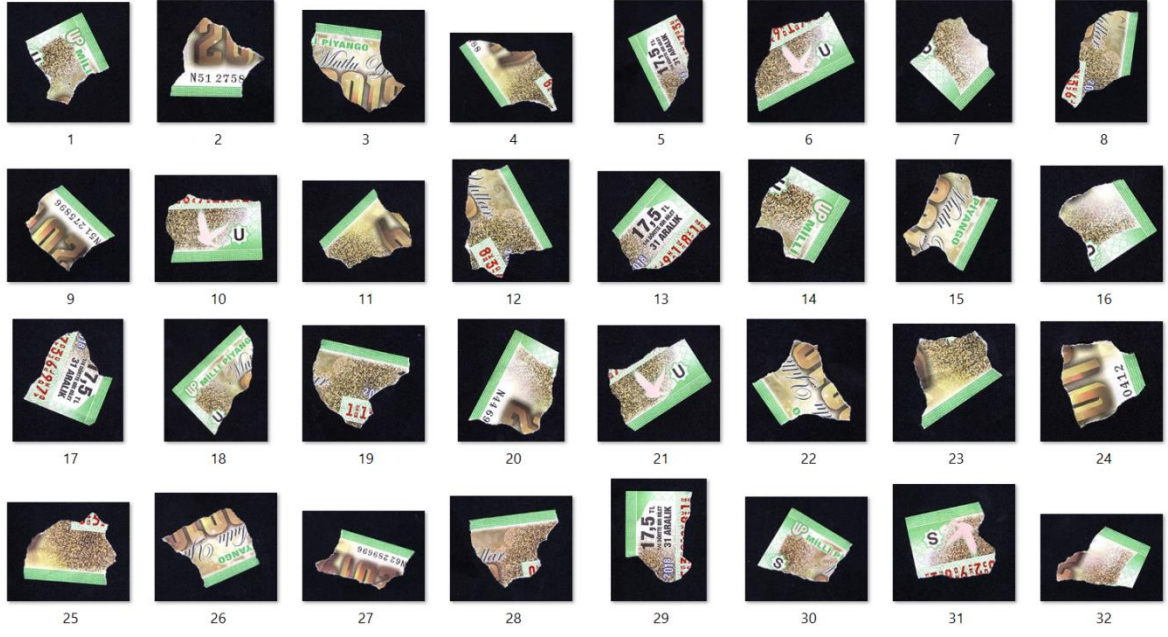


Şekil 3.23. Parçalanmış banknotların yeniden oluşturulma sonuçları

Yukarıda verilen şekillerde görüldüğü gibi bilgisayar destekli sistem ile parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

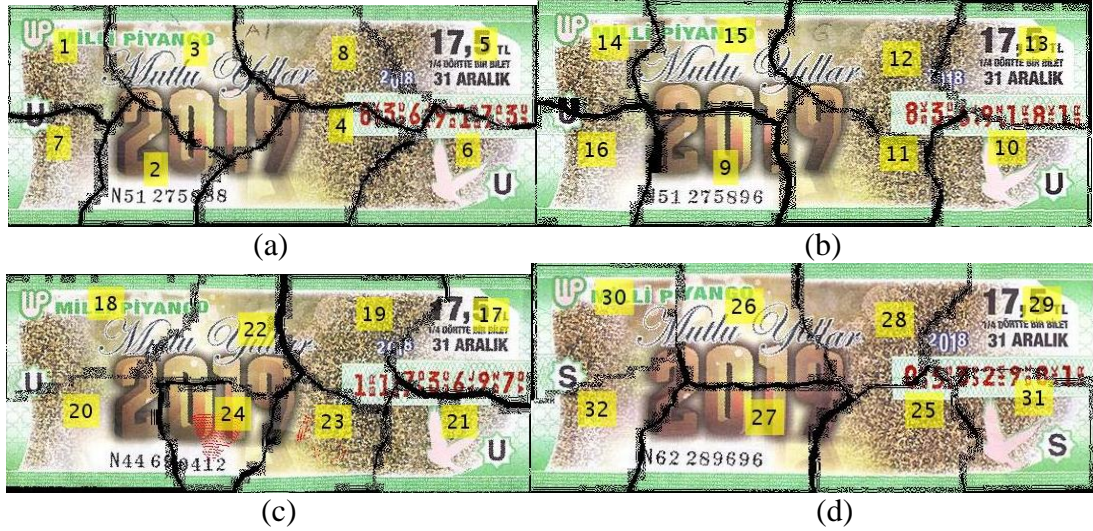
(c) Çoklu yeniden oluşturma işleminde global tutarlılığın sağlanması

Çoklu yeniden oluşturma işlemi için veri setinde 8 parçaya ayrılmış 4 bilet seçilmiştir. Biletlere ait parçalar Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Aynı tip 4 adet bilete ait parçalar

Geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile söz konusu problem başarılı bir şekilde çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Parçalanmış 4 adet biletin geliştirilen bilgisayar destekli sistem tarafından yeniden oluşturulması

Şekil 3.24'te parçaların dijital hal getirilmesinde her bir parçaya numara atanmıştır. Verilen numaralar, bilgisayar destekli sistem tarafından Şekil 3.5'te görüldüğü gibi

yeniden oluşturma sonuçları üzerinde gösterilmiştir. Bilgisayar destekli sistem kullanıldığında problem çözümünde parçaların eşleştirilmesine gerek duyulmayacaktır. Yalnızca Şekil 3.24'te verilen numaralara göre parçaların bir araya getirilmesi yeterli olacaktır. Söz konusu problemin çözümünde bilgisayar destekli sistemde AKAZE ve Zernike moment tabanlı yapılan eşleştirme işlemleri uygulanmış ve sonrasında şekil ve içerik tabanlı yaklaşım kullanılarak global tutarlık sağlanmıştır. Problem çözümü, toplamda 1 dakika 35 saniyede sürmüştür. Problem çözümünde kullanılan bilgisayar, QuadCore Intel Core i5-7400, 3400 MHz işlemciye, 16 GB ana belleğe ve nVIDIA GeForce GTX 1060 6GB ekran kartına sahiptir. Söz konusu problem, bilgisayar desteği olmadan çözülmeye çalışılmıştır. Problem çözümünde harcanan süre Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Çoklu yeniden oluşturma probleminin bilgisayar desteği olmadan çözüm süreleri

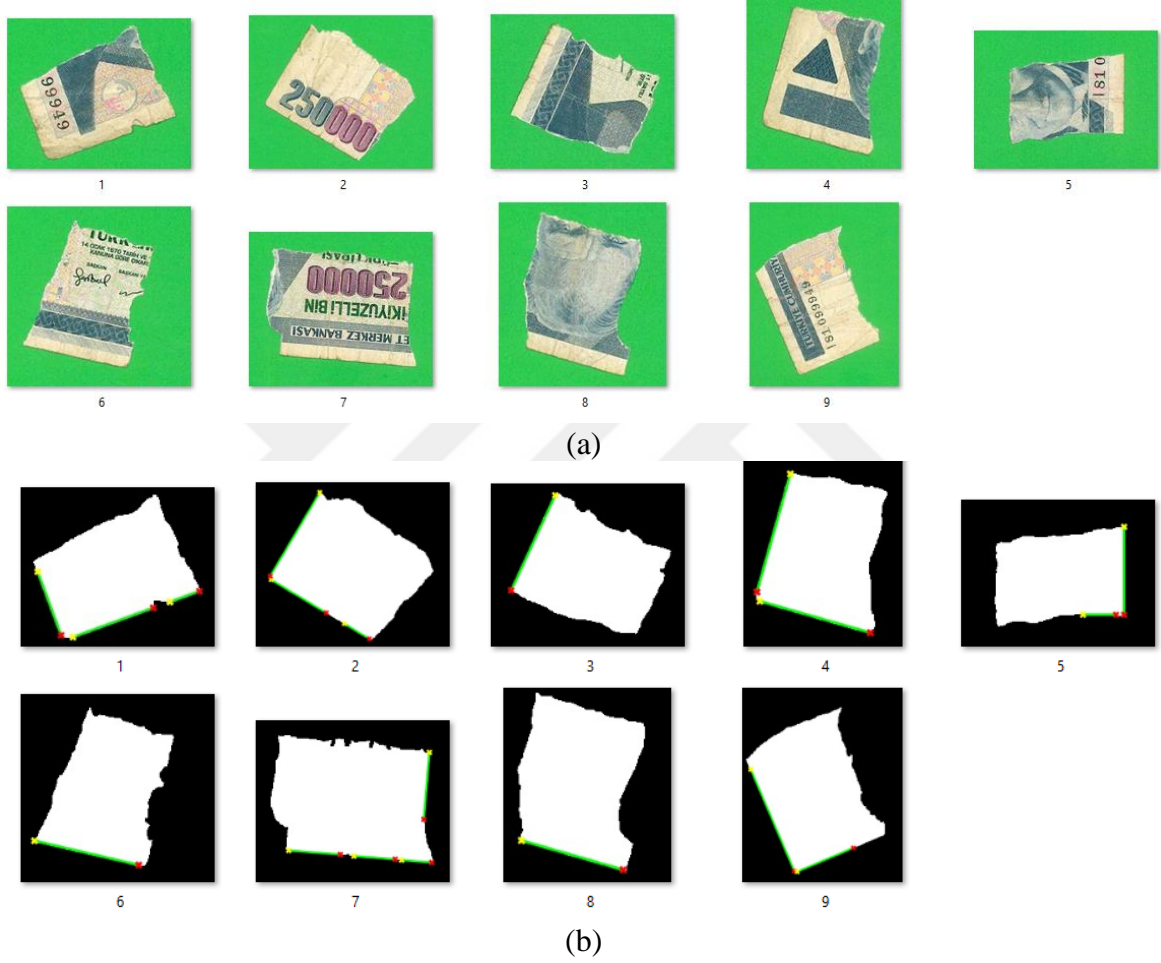
Kişiler	Problemi Çözme Süresi (Dakika)
1	14.40
2	6.14
3	12.12
4	11.41
5	10.16
Ortalama	10.84

Tablo 3.7'de problem çözümünde kişilere referans görüntü verilmiştir. Problem bilgisayar desteği olmadan ortalama 10 dakika 84 saniyede çözülmüştür. Geliştirilen bilgisayar destekli sistem sayesinde söz konusu problemin çözüm süresi azaltılmıştır.

3.2. Geliştirilen Ön Gruplama Yöntemi ile Problem Çözümünün Hızlandırılması

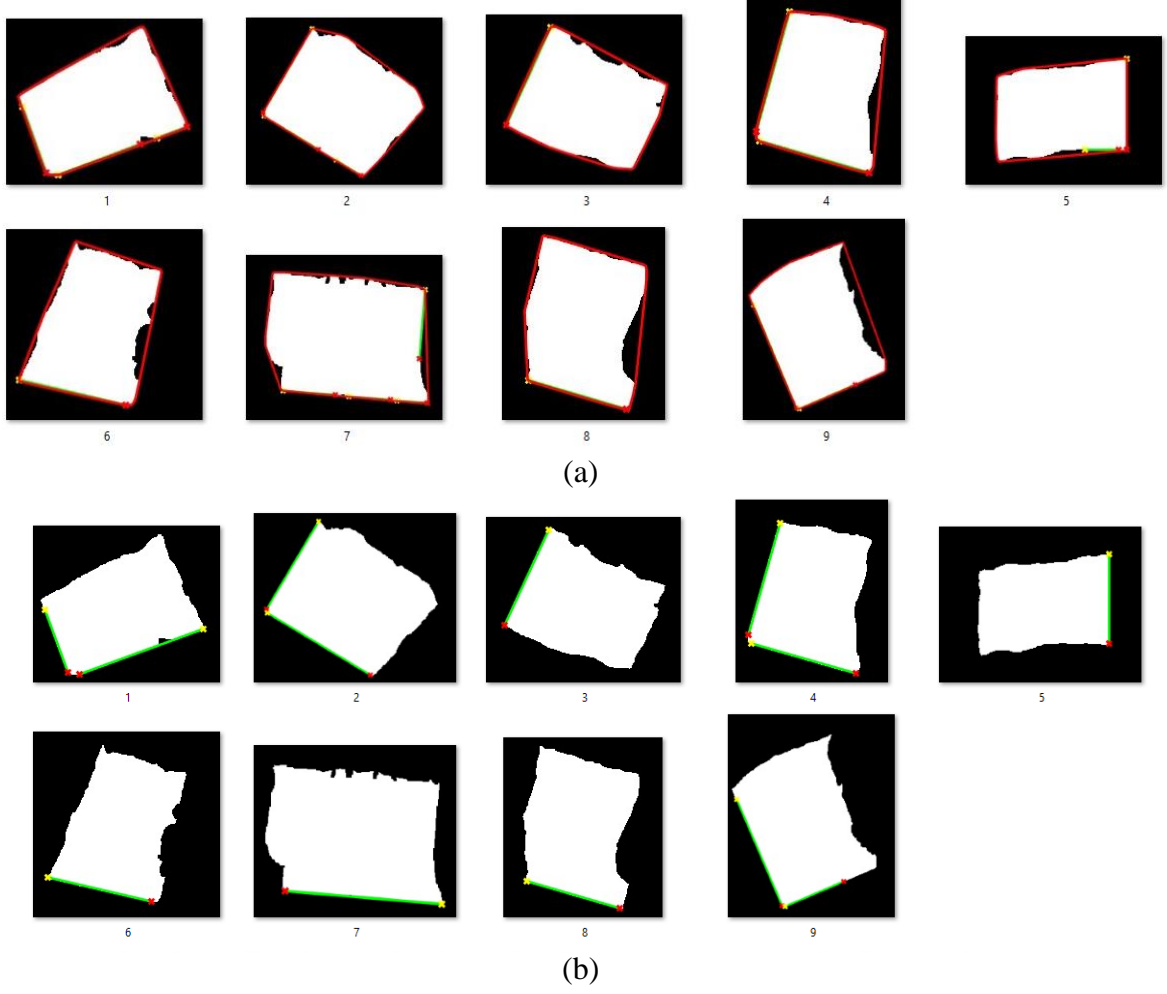
Bu tez ile literatürde ilk defa ele alınan parçalanmış nesnelerin ön gruplandırılma işleminin yeniden oluşturma sürecini ne kadar hızlandırdığını ortaya koymak için gerçek veri seti üzerinde kartpostal, bilet, fotoğraf ve bazı banknotlar üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Ön gruplama yöntemi ile problem çözümünün ne derece hızlandırıldığı bu çalışmada Zernike moment kullanan blok tabanlı yöntem üzerinden ortaya konmuştur.

Blok tabanlı eşleştirme işlemlerinin dezavantajı eşleştirme süresinin anahtar tabanlı nokta tabanlı yöntemlere göre daha fazla zaman almasıdır. Bu kısımda ilk etapta ön gruplama işlemlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Veri setinde yıpranmış gerçek bir 250.000 TL'lik banknot seçilmiştir. Bu banknota ait parçaların kende içlerinde gruplandırılması Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. (a) 250.000 TL'lik bir banknota ait parça görüntüleri (b) parçala kenarlarında Hough tabanlı yaklaşım ile düz çizgilerin tespit edilmesi

Şekil 3.26'da görüldüğü gibi Hough tabanlı yaklaşım ile parça kenarlarında aykırı ve ayırık (kesik) düz çizgiler tespit edilmiştir. Önerilen yaklaşım ile Şekil 3.27'deki gibi aykırı düz çizgiler elimine edilmiş ve ayırık (kesik) düz çizgiler birleştirilmiştir.



Şekil 3.27. (a) Parça sınırlarına kapalı çevrim uygulanması (b) aykırı düz çizgiler elenip ayık çizgiler birleştirilme sonucu

Parça sınırlarına minimum kapalı çevrim uygulandığında Şekil 3.27. a'da 5 ve 7 nolu parçalarda aykırı düz çizgiler tespit edilmiştir. Söz konusu aykırı düz çizgiler önerilen yaklaşım ile elenip ayık düz çizgiler birleştirildiğinde parça sınırlarında oluşan nihai düz çizgiler Şekil 3.27. b'deki gibi tespit edilmiştir. Parça sınırlarından çıkarılan özelliklere göre parçaların gruplandırılma sonuçları Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Parçaların kendi içlerinde gruplandırılması

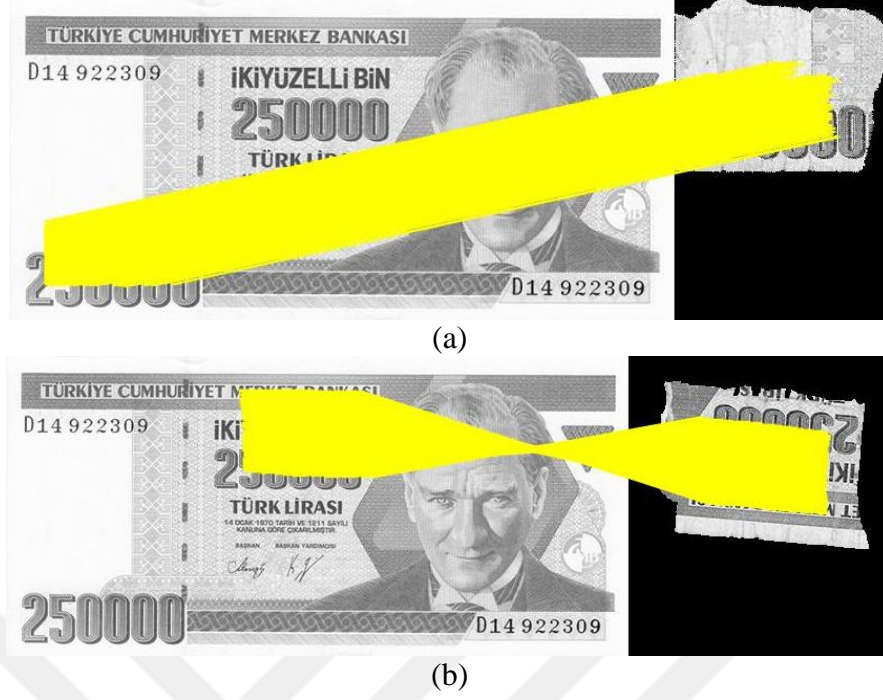
Parça No	Grubu	Rotasyon Açısı
1	Köşe	-20.11°
2	Köşe	30.90°
3	Kenar	-65.07°
4	Köşe	15.87°
5	Kenar	-90°
6	Kenar	13.03°
7	Kenar	4.39°
8	Kenar	16.10°
9	Köşe	-23.02°

Tablo 3.8’de verilen rotasyon açı tahmin sonuçlarına göre parçalar Şekil 3.28’deki gibi hizalanmıştır.



Şekil 3.28. Parçaların hizalanması

Şekil 3.28’de parçaların rotasyonu yapılarak Zernike moment kullanan blok tabanlı eşleştirme yöntemi ile parçaların referans görüntüde eşleştirileceği bölgeler başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.29’da parçaların referans görüntüde ilgili oldukları bölgelere eşleştirilmesi ile ilgili birkaç örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.29. (a) Köşe (b) kenar parçanın Zernike moment kullanan blok tabanlı yöntem ile eşleştirilmesi

Şekil 3.29'da verilen referans görüntü, 594x287 boyutlarına sahiptir. Ele alınan problemde görüntü farklılığı fazla olduğu için Zernike momentte iterasyon sayısı 7'den 15'e çıkarılan ele alınan problem başarılı bir şekilde çözülmüştür. Elde edilen sonuç Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Parçalanmış 250.000 TL'lik banknotun Zernike moment kullanan blok tabanlı yöntem ile yeniden oluşturulması

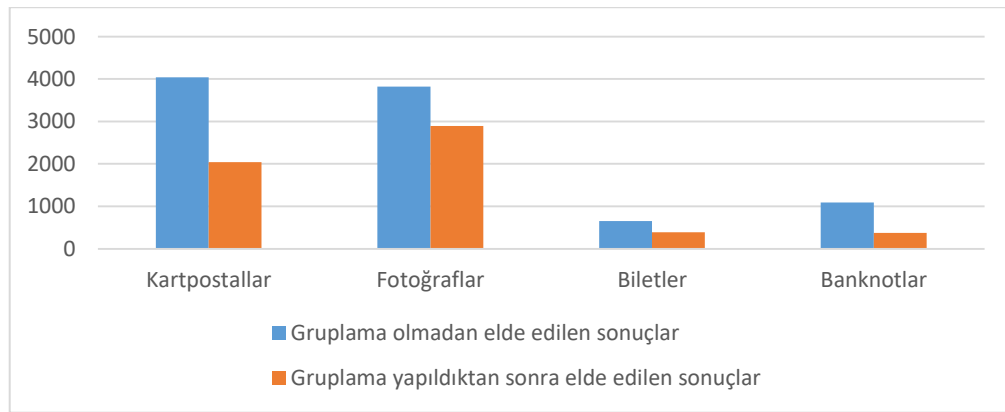
Ön gruplama işlemi yapılmadan yapılan yeniden oluşturma süresi 721 saniye sürmüştür. Ön gruplama yapıldıktan sonra yapılan yeniden oluşturma süreci 433 saniyeye düşmüştür. Ön gruplamaya ise toplamda 1.5 saniye zaman harcanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlardan bazıları Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Blok tabanlı olarak parçaların yeniden oluşturma süreleri

Nesne türü	Parça Sayısı	Nesne Boyutu	Yeniden Oluşturma Süreleri (Saniye)		Süre Farkı
			Gruplama yok	Gruplama var	
Kartpostal	12	640x453	545	206	339
Kartpostal	15	640x453	414	194	220
Kartpostal	14	640x453	455	223	232
Fotoğraf	27	790X571	831	617	214
Fotoğraf	22	790X571	983	740	243
Fotoğraf	10	571X377	217	115	102
Bilet	10	559x229	38	26	12
Bilet	10	559x229	39	25	14
Banknot	10	493X247	37	23	14
Banknot	11	597X287	104	60	44
Toplam fark			3663	2229	1434

Tablo 3.9’da elde edilen sonuçlarda parçaların eşleştirilmesinde kullanılan zernike momentte yinemele sayısı 7 olarak alınmıştır. Verisetindeki gerçek verisetinde gruplama işlemi yapılarak yeniden oluşturulan nesnelere ait sonuçlar grafik halinde Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.31. Parçalanmış nesnelere blok tabanlı yöntem ile yeniden oluşturma süreleri

Önerilen gruplama yöntemi ile parçalanmış nesnelerin toplam yeniden oluşturma süresi %40.63 oranında azaltılmıştır. Önerilen gruplama yöntemi verisetinde bulunan 467 parçayı 23.89 saniye kendi içlerinde başarılı bir şekilde gruplandırmıştır.

3.3. Yeniden Oluşturma Sonuçlarının İlgili Oldukları Alana Göre Değerlendirmesi

Parçalanmış banknotların yeniden oluşturulmasında bankacılık alanında değerlendirilerek bilgisayar destekli sistem tarafında elde edilen sonuçlarda banknotların yüzeylerindeki kayıp oranları önerilen yaklaşım ile başarılı bir şekilde hesaplanmıştır. Şekil 3.32’de örnek bir sonuç gösterilmiştir.



Şekil 3.32. (a) Referans görüntü (b) Bilgisayar destekli sistem tarafından yeniden oluşturulan bir banknot

Şekil 3.32’de parçalanmış banknota ait parçalar vardır. Söz konusu banknotun banknotun yüzeyindeki kayıp oranı ise aşağıdaki gibi çıkmıştır.

$$TBL(5YTL) = \left[100 - \left(\frac{127150}{175644} \times 100 \right) \right] = \%27.60$$

olarak hesaplanmıştır.

5 YTL’de kayıp oranı yaklaşık $\frac{1}{4}$ olarak çıkmıştır. Ülkemiz merkez bankası tarafından ödeme yapılması için bu oran kabul görecektir.

Geliştirilen bilgisayar destekli sistem tarafından gerçekleştirilen yeniden oluşturma işlemleri önerilen yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Tablo 3.10’da söz konusu nesnelerin yeniden oluşturulmasında bilgisayar destekli sistemin başarı oranları hesaplanmıştır.

Tablo 3.10. Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasının önerilen yaklaşım ile değerlendirilmesi

Yeniden Oluşturulan Nesnenin türü	Başarı oranı (%)
Şekil 3.19.a Fresk	97.50
Şekil 3.19.b Fresk	97.93
Şekil 3.20.a Bilet	97.13
Şekil 3.20.b Bilet	99.86
Şekil 3.21.a Kartpostal	99.17
Şekil 3.21.b Kartpostal	98.75
Şekil 3.22.a Fotoğraf	97.88
Şekil 3.22.b Fotoğraf	96.91
Şekil 3.23.c Banknot	99.17
Şekil 3.23.f Banknot	98.91
Şekil 3.25.a Bilet	98.98
Şekil 3.25.b Bilet	98.82
Şekil 3.25.c Bilet	98.78
Şekil 3.25.d Bilet	99.00
Şekil 3.30 Banknot	99.42
Şekil 3.32 Banknot	97.31
Ortalama	98.47

Veri setindeki parçalanmış nesnelere geliştirilen bilgisayar destekli sistem ile yüksek başarı oranında yeniden oluşturulmuştur.

Parçalanmış sanat eserlerinin yeniden oluşturulması restorasyon alanında değerlendirilmiştir. Verisetinde tahribat oranı fazla olan bir fresk seçilmiştir. Şekil 3.33'te parçalanmış fresk ile bu freskin reproduksiyonu işlemi yapılan bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.33. (a) Orijinal fresk (b) Reproduksiyonu yapılmış fresk

Şekil 3.33.a’da verilen freskin orijinal hali bilinmediği farz edilsin. Söz konusu fresk sentetik olarak parçalanmıştır. Önerilen bilgisayar destekli sistem tarafından söz konusu fresk referans görüntü (reprodüksiyonu yapılmış görüntü) kullanarak Şekil 3.34’teki gibi yeniden oluşturulmuştur.



Şekil 3.34. (a) Yeniden oluşturulan fresk (b) Reprodüksiyonu yapılmış görüntüden faydalanarak yeniden oluşturulmuş freskin onarılması

Şekil 3.34.a’da verildiği parçalanmış fresk yeniden oluşturulmuştur. Söz konusu freskin onarılması reprodüksiyonu yapılmış görüntüden örnekler alınarak gerçekleştirildiğinde Şekil 3.34’.b’deki gibi bir sonuç elde edilmiştir. Referans görüntüde renkler daha canlı olduğu için restorasyon işleminde yapaylıklar oluşmuştur. Yeniden oluşturulan fresk örnek tabanlı içboyama yöntemi ile onarıldığında elde edilen sonuç Şekil 3.35’te verilmiştir.



Şekil 3.35. Yeniden oluşturulan freskin içboyama yöntemi kullanılarak onarılması

Şekil 3.35'te görüldüğü gibi parçalanmış freskin yeniden oluşturma sonucu iyileştirilmiştir. Örnek tabanlı içboyama yönteminde blok boyutu 9x9 olarak belirlenmiş ve arama penceresi ise 36x36 olarak seçilmiştir. Onarılan görüntüde PSNR değeri 25.02 db olarak elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tezde parçalanmış nesnelerin bilgisayar destekli olarak yeniden oluşturulma süreçlerinde karşılaşılan alt problemlerin çözülmesine yönelik önemli katkılar sağlanmıştır. Önerilen bilgisayar destekli sisteme ilişkin sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1. Literatürde referans görüntüsü bulunan parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulması ile ilgili herhangi bir veri seti paylaşılmamıştır. Bu tez kapsamında kapsamlı bir veri seti oluşturularak çift yüzlü yapboz problemi, görüntü farklılığı, parçalarda oluşan tahribatlar ve farklı tip nesnelere (kartpostal, banknot, fresk, fotoğraf ve bilet) görüntü yapıları ile ilgili problemler ele alınmıştır.
2. Parçalar ile referans görüntünün eşleştirilmesinde benzer konu üzerinde yapılan çalışmalarda [38, 51, 76, 77] kullanılan anahtar nokta tabanlı bir yöntem olan SIFT yöntemi, literatürde yaygın kullanılan diğer anahtar nokta tabanlı yöntemler (SURF, BRISK ve AKAZE) ile karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında oluşturulan gerçek veri seti üzerinde eşleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinden hangi yöntemin kullanılacağına Borda sayısı seçim yöntemi ile karar verilmiştir. Seçimi AKAZE yöntemi kazanmıştır. Borda sayısı üzerinden verilen kararın isabetli olup olmadığı ile ilgili kontroller yapılmıştır. AKAZE yöntemi kullanarak yapılan eşleştirme işlemlerinde yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir. Bu tez kapsamında farklı nesne tipleri üzerinde eşleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Düşük doku özelliği olan parçalar ile referans görüntülerin eşleştirilmesinde anahtar nokta tabanlı yöntemlerin etkisiz kaldığı durumlar gözlenmiştir. Söz konusu parçaların referans görüntüler ile eşleştirilmesi için blok tabanlı yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen blok tabanlı yöntemde Zernike momentler, Hu momentlere göre oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Parçaların referans görüntüler ile eşleştirme işlemi, AKAZE ve Zernike moment tabanlı yöntem ile güçlendirilmiştir.
3. Çıkış görüntülerin elde edilmesi sürecinde ilk aşama olan parçaların hizalanma problemi önerilen kapalı çevrim tabanlı yöntem ile çözülmüştür. Önerilen rotasyon açısı tahmin yöntemi ile [77]'deki çalışmada sunulan açı tahmin yöntemi karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem, başarılı sonuçlar verirken; [77]'de

geliştirilen rotasyon açısı tahmin yöntemi ile gerçek verilerde parçaların parçaların hizalanmasında yetersiz kalmıştır. İkinci aşamada düzgün hizalanan parçalar boş bir çerçeveye yerleştirilerek parçalar bir araya getirilmiştir. Parçalara ait piksellerin belirlenme sürecinde önerilen CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım ile tarayıcılardan kaynaklanan renk problemlerinin üstesinden gelinmiştir. Önerilen yaklaşım farklı veri seti üzerinde uygulandığında başarılı sonuçlar alınmıştır. Ayrıca CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım Otsu tabanlı yaklaşım ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yaklaşım, Otsu tabanlı yaklaşıma göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Parçaların boş bir çerçeveye yerleştirilerek bir araya getirilme sürecinde çift taraflı yapboz problemi önerilen yerleştirme yaklaşımı ile başarılı bir şekilde çözülmüştür. Ayrıca geliştirilen bilgisayar destekli sistemde aynı tip birden fazla nesnenin çoklu olarak yeniden oluşturulma süreçleri ele alınmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

4. Önerilen ön gruplama sayesinde Zernike moment tabanlı yöntem ile yapılan yeniden oluşturma işlem süreleri ortalama %40.63 oranında azaltılmıştır.
5. Parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturma problemleri ilgili olabilecekleri alanlara göre ele alınmıştır. Adli bilimi ilgilendirebilecek parçalanmış banknotların bilgisayar destekli sistemler ile yeniden oluşturulma süreçlerinde parçaların tarama işlem sayısı önerilen yaklaşım ile azaltılabilmektedir. Bankacılık alanını ilgilendiren parçalanmış banknotların yeniden oluşturulmasında banknotların yüzeyindeki kayıp oranları önerilen yaklaşım ile başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Parçalanmış sanat eserlerinin yeniden oluşturulmasında ayrıca içboyama yöntemi ile onarılma işlemleri yapılarak restorasyon alanında yapılabilecek hataların azaltılabileceği gösterilmiştir. Bilgisayar destekli sistemlerin başarı oranını hesaplayan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile çalışmada geliştirilen bilgisayar destekli sistemin başarı oranı ortaya konmuştur.

Sonuç olarak bu tezde geliştirilen bilgisayar destekli yeniden oluşturma sistemi ile restorasyon, bankacılık ve adli bilimler gibi birçok alanı ilgilendiren problemlerin daha az bir sürede çözülmesine yönelik önemli bir alt yapı oluşturulmuştur.

5. ÖNERİLER

Literatürde ele alınan yapboz problem türü aynı olmasına rağmen yapılan çalışmalarda farklı anahtar kelimeler (2D puzzle, jigsaw puzzle) kullanılmıştır. Bununla birlikte aynı tip parçalanmış nesnelerin yeniden oluşturulmasında da (torn documents, torn page, ripped up documents etc.) ortak anahtar kelimeler kullanılmamıştır. Literatürde ortak bir terminolojinin geliştirilmemiş olması, konu ile ilgili yapılan yayınların tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerin kapsamı net bir şekilde ortaya konmamıştır. Bu tezde 2B yapboz problemleri detaylı bir şekilde irdelenmiş ve yapboz problemlerinin oldukça zorlayıcı farklı alt problemler içerdiği görülmüştür. Birden fazla çözüm sonucu olan yapboz problemlerinin olması, farklı tip nesnelerin (belge, fresk, banknot vb.) yeniden oluşturulmasında kendilerine özgü alt problemler (metin bütünlüğü, görsel bütünlük vs.) olması, aynı tip nesnelere yeniden oluşturulmasında farklı alt problemler (parçalanma şekli vb.) içerisinde barındırması bunlardan bir kaçıdır. Dolayısıyla geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerin kapsamlarının daha net bir şekilde ortaya konması gerekir. Ortak bir terminolojinin geliştirilmesinde ve geliştirilecek bilgisayar destekli sistemlerin kapsamının belirlenmesinde bu tezde yapılan sınıflandırmalardan faydalanılabilir.

Çalışmada geliştirilen CIELab renk uzayı tabanlı yaklaşım ile parçalara ait piksellerin belirlenmesi cihazdan bağımsız bir yapıda gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yaklaşım pratiktir ve yapboz problemleri ile ilgili diğer çalışmalarda da kullanılabilir. Parçalar ile referans görüntünün eşleştirilmesinde kullanılacak anahtar nokta tabanlı yöntem, önerilen Borda sayısına dayalı yaklaşım ile belirlenmiştir. Bu yaklaşımın isabetli olduğu deneysel sonuçlarla ortaya konmuştur. Dolayısıyla Borda sayısı diğer görüntü eşleştirme problemlerinde de hangi yöntemin kullanılacağına karar verme aşamasında kullanılabilir.

Yapboz problemlerinin bilgisayar destekli çözüm süreçlerinde dikkat edilecek hususlar ele alınan problemin ilgili olduğu alana göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla yapboz problemlerinin genel bir yapıda ele alınmasından ziyade ilgili oldukları alana göre daha spesifik bir yapıda değerlendirmesinde fayda vardır. Bu tarz değerlendirmeler ile geliştirilecek bilgisayar destekli yöntemlerin uygulanabilirliğini daha fazla olacaktır. Bu tezde bu tarzda değerlendirmeler yapılmıştır. Adli bilim alanında

yapılacak yeniden oluşturma işlemlerinde taratılma sayısı azaltılarak parçalara uygulanabilecek fiziksel temas azaltılmıştır. Bankacılık işlemlerinde yeniden oluşturulan banknotta kayıp oranının belirlenmiştir. Restorasyon işlemlerinde yeniden oluşturulan nesnenin orijinaline uygun bir şekilde onarılmasına yönelik çözümler sunulmuştur. Yapboz problemlerinin ilgili oldukları alana göre irdelendiğinde alt problemlerin sayısı daha da arttırılabilecektir.

Parçalar ile referans görüntülerin eşleştirilmesinde görüntü farklılığının olması eşleştirme işlemini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Görüntü farklılığı problemleri, parça yüzeylerinde oluşan tahribatlar, bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Yalnızca banknotun yüzeyinde tozlanma, lekelenme, kimyasal bozulma vb. birçok bozulma türü vardır. Ayrıca farklı tip nesnelere ait parçaların yüzeylerinde farklı türde bozulmalar olabilmektedir. Örnek olarak kâğıt türündeki nesnelere ait parçaların yüzeylerinde buruşmalar olurken parçalanmış fresklerin yüzeylerinde böyle bir durum yoktur. Dolayısıyla literatürde eşleştirme işlemini zorlaştıran parça yüzeylerindeki bozulma türlerine göre bozulma oranlarını belirleyecek ölçütler sunulmalıdır. Böylece geliştirilen bilgisayar destekli sistemlerin problem çözümünü ne derece gerçekleştirdiği daha net bir şekilde ortaya konacaktır. Bununla birlikte bilgisayar destekli sistemlerin karşılaştırılması daha kolay bir şekilde yapılabilecektir.

6. KAYNAKLAR

1. <https://www.dw.com/en/a-look-at-the-collapse-of-colognes-city-archives/g-42168879>. 22 Temmuz 2019.
2. <https://qz.com/111073/germany-is-reconstructing-piles-of-flood-damaged-cash-just-to-burn-them>. 22 Temmuz 2019.
3. <http://www.dw.com/en/the-stasi-puzzle-with-600-million-pieces/a-17039143>. 22 Temmuz 2019.
4. <https://www.bbc.com/news/av/world-middle-east-31653642/islamic-state-destroys-ancient-statues-in-iraq>. 22 Temmuz 2019.
5. <https://www.nydailynews.com/news/world/experts-assess-damage-sculptures-isis-destroyed-syria-article-1.2604081>. 22 Temmuz 2019.
6. <https://news.artnet.com/art-world/syria-isis-palmyra-restoration-1338257>. 22 Temmuz 2019.
7. <https://www.bbc.com/news/magazine-16036967>. 22 Temmuz 2019.
8. http://www.chinadaily.com.cn/china/2012-05/05/content_15216969.htm. 22 Temmuz 2019.
9. Kleber, F. ve Sablatnig, R. A., Survey of techniques for document and archaeology artefact reconstruction, In 2009 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, Temmuz 2009, IEEE, 1061-1065.
10. Demaine, E. D. ve Demaine, M. L., Jigsaw puzzles, edge matching, and polyomino packing: Connections and complexity, Graphs and Combinatorics, 23,1 (2007) 195-208.
11. Wolfson, H., Schonberg, E., Kalvin, A. ve Lamdan, Y., Solving jigsaw puzzles by computer, Annals of Operations Research, 12, 1 (1988) 51-64.
12. Bellmore, M. ve Nemhauser, G. L., The traveling salesman problem: A survey, Operations Research, 16, 3 (1968) 538-558.
13. <http://www.datapointed.net/2011/11/darpa-shredder-challenge>. 22 Temmuz 2019
14. <https://newatlas.com/darpa-shredder-challenge-solved/20732>. 22 Temmuz 2019.

15. Freeman, H. ve Garder, L., Apictorial jigsaw puzzles: The computer solution of a problem in pattern recognition, IEEE Transactions on Electronic Computers, 2 (1964) 118-127.
16. Webster, R. W., LaFollette, P. S. ve Stafford, R. L., Isthmus critical points for solving jigsaw puzzles in computer vision, IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 21, 5 (1991) 1271-1278.
17. Zhu, L., Zhou, Z. ve Hu, D., Globally consistent reconstruction of ripped-up documents, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 1 (2007) 1-13.
18. Fornasier, M. ve Toniolo, D., Fast, robust and efficient 2D pattern recognition for re-assembling fragmented images, Pattern Recognition, 38, 11 (2005) 2074-2087.
19. Lin, H. Y. ve Fan-Chiang, W. C., Reconstruction of shredded document based on image feature matching, Expert Systems with Applications, 39, 3 (2012) 3324-3332.
20. Chen, J., Ke, D., Wang, Z. ve Liu, Y., A high splicing accuracy solution to reconstruction of cross-cut shredded text document problem, Multimedia Tools and Applications, 77, 15 (2018) 19281-19300.
21. Pöhler, D., Zimmermann, R., Widdecke, B., Zoberbier, H., Schneider, J., Nickolay, B. and Krüger, J., Content representation and pairwise feature matching method for virtual reconstruction of shredded documents, In 2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), Eylül 2015, IEEE, 143-148.
22. Goldberg, D., Malon, C. ve Bern, M., A global approach to automatic solution of jigsaw puzzles, In Proceedings of the eighteenth annual symposium on Computational geometry, Temmuz 2002, ACM, 82-87.
23. De Bock, J., De Smet, R., Philips, W. ve D'Haeyer, J., Constructing the topological solution of jigsaw puzzles, In 2004 International Conference on Image Processing (ICIP'04), Ekim 2004, Singapore, Singapore, IEEE, 2127-2130.
24. Weiss-Cohen, M. ve Halevi, Y., Knowledge retrieval for automatic solving of jigsaw puzzles, In International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06), Kasım 2005, IEEE, 379-383.
25. Roy, A. ve Garain, U., A Probabilistic Model for Reconstruction of Torn Forensic Documents, In 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, Ağustos 2013, Vienna, Austria , IEEE, 494-498.
26. Coffin, S., Geometric puzzle design, AK Peters/CRC Press, 2006.
27. <http://mathworld.wolfram.com/HaberdashersProblem.html>. 22 Temmuz 2019.

28. Yamada, F. M. ve Batagelo, H. C., A comparative study on computational methods to solve tangram puzzles, Conference on Graphics, Patterns and Images, (SIBGRAPHI'17), Ekim 2017, Niterói, Brasil, ACM, 1-4.
29. Ashlock, D. ve Taylor L. Evolving polyomino puzzles, 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Temmuz 2016, Vancouver, BC, Canada, IEEE, 327-334
30. Stieber, A., Schneider, J., Nickolay, B. ve Krüger, J., A contour matching algorithm to reconstruct ruptured documents, In Joint Pattern Recognition Symposium, Eylül 2010, Berlin, Germany, Springer, 121-130.
31. Richter, F., Ries, C. X. ve Lienhart, R., A graph algorithmic framework for the assembly of shredded documents, In 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Temmuz 2011, Barcelona, Spain, IEEE, 1-6.
32. Wei, Y., Cao, L., Yu, W. ve Wu, H., A Novel Matching Technique for Two-Sided Paper Fragments Reassembly, In International Conference on Intelligent and Interactive Systems and Applications, Kasım 2017, Springer, Cham, 691-697.
33. <http://www.archduke.org/eternity/>, Selby, A.: Eternity page. 22 Temmuz 2019.
34. da Gama Leitão, H. C. ve Stolfi, J., A multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24, 9 (2002) 1239-1251.
35. Ukovich, A. ve Giovanni R., Features for the reconstruction of shredded notebook paper, IEEE International Conference on Image Processing 2005, Eylül 2005, Genova, Italy IEEE, III-93.
36. Yao, F. H. ve Shao, G. F., A shape and image merging technique to solve jigsaw puzzles, Pattern Recognition Letters, 24, 12 (2003) 1819-1835.
37. Zhang, K. ve Li, X., A graph-based optimization algorithm for fragmented image reassembly, Graphical Models, 76, 5 (2014) 484-495.
38. Gwo, C.Y., Wei C.H. ve Deng A.W., Matching of Feature Points for Moneynote Fragment Assembly, 2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering. Nisan 2015, Shanghai, China, IEEE, 293-296.
39. Li, P., Fang, X., Pan, L., Piao, Y. ve Jiao, M., Reconstruction of shredded paper documents by feature matching, Mathematical Problems in Engineering, (2014) 1-9.
40. Hopper, E. ve Brian C. T., A review of the application of meta-heuristic algorithms to 2D strip packing problems, Artificial Intelligence Review, 16,4 (2001) 257-300.

41. Zhao, Y. X., Su, M. C., Chou, Z. L. ve Lee, J., A puzzle solver and its application in speech descrambling, In WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, Ocak 2007, Gold Coast, Australi, WSEAS, 171-176.
42. Wang, C., Determining the molecular conformation fom distance or density data, PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge, MIT, 2000.
43. Marande, W. ve Burger, G., Mitochondrial DNA as a genomic jigsaw puzzle, Science, 318, 5849 (2007) 415-415.
44. Li, C., Cracking a hierarchical chaotic image encryption algorithm based on permutation, Signal Processing, 118 (2016) 203-210.
45. Chuman, T., Kurihara, K. ve Kiya, H., On the security of block scrambling-based etc systems against jigsaw puzzle solver attacks, In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Mart 2017, New Orleans, USA, IEEE, 2157-2161.
46. Memon, N. ve Pal, A., Automated reassembly of file fragmented image, s using greedy algorithms, IEEE Transactions on Image Processing, 15, 2 (2006) 385-393.
47. Cho, T. S., Butman, M., Avidan, S. ve Freeman, W. T., The patch transform and its applications to image editing, In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Haziran 2008, Anchorage, AK, US, IEEE, 1-8.
48. <http://apps.webofknowledge.com>. 25 Temmuz 2019.
49. Sagiroglu,. S. ve Erçil, A., A texture based matching approach for automated assembly of puzzles, In 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), Ağustos 2006, Hong Kong, China, IEEE, 1036-1041.
50. Papaodysseus, C., Panagopoulos, T., Exarhos, M., Triantafillou, C., Fragoulis, D. ve Dumas, C., Contour shape based reconstruction of fragmented, 1600 bc wall paintings. IEEE Transactions on Signal Processing, 50,6 (2002)1277–1288.
51. Li, H., Zheng, Y., Zhang, S. ve Cheng, J., Solving a special type of jigsaw puzzles: Banknote reconstruction from a large number of fragments, IEEE Transactions on Multimedia, 16, 2 (2013) 571-578.
52. Hoff, D. J. ve Olver, P. J., Automatic solution of jigsaw puzzles, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 49, 1 (2014) 234-250.
53. Justino, E., Oliveira, L. S. ve Freitas, C., Reconstructing shredded documents through feature matching, Forensic Science International, 160, 2-3 (2016) 140-147.

54. Pimenta, A., Justino, E., Oliveira, L. S. ve Sabourin, R., Document reconstruction using dynamic programming, In 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Nisan 2009, Taipei, Taiwan, IEEE,1393-1396.
55. Lalitha, K. S., Das, S., Menon, A. ve Varghese, K., Graph-Based Clustering for Apictorial Jigsaw Puzzles of Hand Shredded Contentless Pages, In International Conference on Intelligent Human Computer Interaction, Aralık 2016, Springer, Cham,135-147.
56. McBride, J. C. ve Kimia, B. B., Archaeological fragment reconstruction using curve-matching, In 2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Haziran 2003, Madison, Wisconsin, USA, IEEE, 3-3.
57. Zhu, Y., Automatic reconstruction of two-dimensional broken objects, In International Conference on Intelligent Computing, July 2013, Berlin, Almanya, Springer, 566-575.
58. Castañeda, A. G., Brown, B. J., Rusinkiewicz, S., Funkhouser, T. A., ve Weyrich, T., Global Consistency in the Automatic Assembly of Fragmented Artefacts, The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Ekim 2011, Prato, Italy, ACM, 73-80.
59. Sizikova, E. ve Funkhouser, T., Wall painting reconstruction using a genetic algorithm, Journal on Computing and Cultural Heritage, 11, 1 (2018) 3.
60. Liu, Y., Qiu, H., Lu, J. ve Fang, Y., Shredded document reconstruction based on intelligent algorithms, In 2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, Mart 2014, Las Vegas, USA, IEEE, 108-113.
61. Xing, N. ve Zhang, J., Graphical-character-based shredded Chinese document reconstruction, Multimedia Tools and Applications, 76, 10 (2017) 12871-12891.
62. Kovalsky, S. Z., Glasner, D. ve Basri, R. A global approach for solving edge-matching puzzles, SIAM Journal on Imaging Sciences, 8, 2 (2015) 916-938.
63. Andaló, F. A., Taubin, G. ve Goldenstein, S., Solving image puzzles with a simple quadratic programming formulation, In 2012 25th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, Ağustos 2012, Ouro Preto, Brazil, IEEE, 63-70.
64. Sholomon, D., David, O. E. ve Netanyahu, N. S., A generalized genetic algorithm-based solver for very large jigsaw puzzles of complex types, In Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence, Haziran 2014, AAAI, 1-7.
65. Jin, S. Y., Lee, S., Azis, N. A. ve Choi, H. J., Jigsaw puzzle image retrieval via pairwise compatibility measurement, In 2014 International Conference on Big Data and Smart Computing (BIGCOMP), Ocak 2014, IEEE,123-127.

66. Nielsen, T. R., Drewsen, P. ve Hansen, K., Solving jigsaw puzzles using image features, Pattern Recognition Letters, 29, 1 (2008) 1924-1933.
67. Andalo, F. A., Taubin, G. ve Goldenstein, S., Psqp: Puzzle solving by quadratic programming. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39, 2 (2016) 385-396.
68. Pomeranz, D., Shemesh, M., ve Ben-Shahar, O., A fully automated greedy square jigsaw puzzle solver, In the Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Haziran 2011, Colorado Springs, CO, USA, USA, IEEE, 9-16.
69. Kosiba, D. A., Devaux, P. M., Balasubramanian, S., Gandhi, T. L. ve Kasturi, K., An automatic jigsaw puzzle solver, In Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition, Ekim 1994, Jerusalem, Israel, IEEE, 616-618.
70. Chung, M. G., Fleck, M. M. ve Forsyth, D. A., Jigsaw puzzle solver using shape and color, In ICSP'98, 1998 Fourth International Conference on Signal Processing (Cat. No. 98TH8344), Kasım 1998, Beijing, China, IEEE, 877-880.
71. Liu, H., Cao, S. ve Yan, S., Automated assembly of shredded pieces from multiple photos, IEEE Transactions on Multimedia, 13, 5 (2011) 1154-1162.
72. Zhang, M., Chen, S., Shu, Z., Xin, S. Q., Zhao, J., Jin, G. ve Beyerer, J., Fast algorithm for 2D fragment assembly based on partial EMD, The Visual Computer, 33, 12 (2017) 1601-1612.
73. Richter, F., Ries, C. X., Cebon, N. ve Lienhart, R., Learning to reassemble shredded documents. IEEE Transactions on Multimedia, 15, 3 (2013) 582-593.
74. Yu, L. S., Ku, H. J., Ting, C. L., Chang, R. I., Wang, Y. C. ve Ho, J. M., Content-Based Feature Matching for Fragment Reassembly of Ceramic Reconstruction, In Proceedings of the 2014 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), Ağustos 2014, IEEE Computer Society, 344-351.
75. Skembris, A. S., Papaodysseus, C. ve Koukoutsis, E., 2D fragmented object reconstruction with the use of the chromatic and thematic content, Pattern Analysis and Applications, 15, 2 (2012) 133-146.
76. Wu, P. H., Ding, J. J., Guo, J. M., Kang, P. J. ve Pu, C. E., Banknote reconstruction from fragments using quadratic programming and SIFT points, In 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Haziran 2014, Melbourne VIC, Australia, IEEE, 570-573.
77. Gwo, C. Y., Wei, C. H., Li, Y. ve Chiu, N. H., Reconstruction of banknote fragments based on keypoint matching method, Journal of Forensic Sciences, 60, 4 (2015) 906-913.

78. Lowe, D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision, 60, 2 (2004) 91-110.
79. Fischler, M. A. ve Bolles, R. C., Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of The ACM, 24, 6 (1981) 381-395.
80. Torr, P. H. ve Zisserman, A., MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, Computer Vision and Image Understanding, 78, 1 (2000) 138-156.
81. Ibraheem, N. A., Hasan, M. M., Khan, R. Z.,- ve Mishra, P. K., Understanding color models: a review, ARPJ Journal of Science and Technology, 2, 3 (2012) 265-275.
82. Bemporad, A. ve Mignone D., A Matlab function for solving Mixed Integer Quadratic Programs, Mayıs 2001.
83. De Smet, P., Reconstruction of ripped-up documents using fragment stack analysis procedures, Forensic Science International, 176, 2 (2008) 124-136.
84. Biswas, A., Partha, B. ve Bhargab B., Reconstruction of torn documents using contour maps, IEEE International Conference on Image Processing 2005, Eylül 2005, Genova, Italy, IEEE, III-517.
85. https://www.cbr.ru/Eng/analytics/standart_acts/others/1778-u_en.pdf. The Central Bank of the Russian Federation, 13 Aralık 2017.
86. <http://fingramota.org/lichnye-finansy/lichnyj-byudzhet/item/478-kak-obmenyat-isporchennuyu-kupyuru>. 22 Temmuz 2019.
87. <http://banknotes.rba.gov.au/damaged-banknotes/damaged-banknotes-policy/>. 13 Aralık 2017.
88. Toler-Franklin C. T., Brown B., Weyrich T., Funkhouser T. ve Rusinkiewicz S., Multi-feature matching of fresco fragments, ACM Transactions on Graphics, 29, 6 (2010) 6.
89. <https://www.dw.com/en/botched-16th-century-sculpture-restoration-in-spain-reminds-of-a-previous-infamous-disaster/a-44419159>. 24 Temmuz 2019.
90. Korumaz, M. ve Korumaz, A. G., Reproduction of Turkish Traditional Wall-Painting using Close Range Photogrammetry, A Case Study in Gaziantep. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38, 5 (2010) 367-371.
91. Cather, S., The Conservation of Wall Paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, Temmuz 1987, Oxford University Press.

92. Güleç, S.A., Yakar, M. ve Korumaz, M., The Photogrammetric Evaluation of The Tiles on Turkish Traditional Building, an Example of Konya”, The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, 5 (2006) 379-384.
93. Bonora, V., Chieli, A., Spanò, A., Testa, P. ve Tucci, G., 3D metric-modelling for knowledge and documentation of architectural structures (royal palace in turin), International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 5 (2003) 60-65.
94. <http://basin.kulturturizm.gov.tr/TR-164598/milli-kutuphane-icerigi-dijital-ortamda.html>. 22 Temmuz 2019.
95. Bay, H., Tuytelaars, T. ve Van Gool, L., SURF: Speeded up robust features, In European conference on computer vision, Mayıs 2006, Springer, 404-417.
96. Leutenegger, S., Chli, M. ve Siegwart, R., BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints, In 2011 IEEE international conference on computer vision (ICCV), Kasım 2011, Barcelona, Spain, IEEE, 2548-2555.
97. Alcantarilla, P. F. ve Solutions, T., Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces, IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell, 34, 7 (2011) 1281-1298.
98. Lamboray, C., A comparison between the prudent order and the ranking obtained with Borda's, Copeland's, Slater's and Kemeny's rules, Mathematical Social Sciences, 54, 1 (2007) 1-16.
99. Plataniotis K. N. ve. Venetsanopoulos A. N., Color Image Processing and Applications, Springer- Verlag, Şubat 18, 2000.
100. <https://www.tcmb.gov.tr>. 23 Temmuz 2018.
101. <https://www.federalreserve.gov>. 23 Temmuz 2018.
102. <https://www.cbr.ru/eng>. 23 Temmuz 2018.
103. <https://www.banknotes.com/tr.htm>. Banknote gallery: Turkey. 15 Kasım 2018.
104. <http://www.koleksiyon.org/>. Numismatic market. 15 Kasım 2018.
105. Kyrychok, T., Shevchuk, A., Nesterenko, V. ve Kyrychok, P., Banknote paper deterioration factors: circulation simulator method, BioResources, 9, 1 (2014) 710-724.
106. Ryu, S. J., Lee, M. J. ve Lee, H. K., Detection of copy-rotate-move forgery using Zernike moments, In International workshop on information hiding, Haziran 2010, Springer, 51-65.

107. Mohamadian, Z. ve Pouyan, A. A., Detection of duplication forgery in digital images in uniform and non-uniform regions, In 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Nisan 2013 Cambridge, UK, IEEE, 455-460.
108. <https://www.metmuseum.org/search-results#!/search?q=wall%20painting>. 22 Mayıs 2019.
109. Saleem S., Bais A., Sablatnig R., Ahmad A. ve Naseer N., Feature points for multisensor images, Comput Electr Eng., 62 (2017) 511–23.
110. Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F. ve Van Gool, L., A comparison of affine region detectors, International Journal of Computer Vision, 65, 1-2 (2005) 43-72.
111. Mikolajczyk, K. ve Schmid, C., A performance evaluation of local descriptors, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2,5 (2005) 1615-1630.
112. Işık, Ş., A comparative evaluation of well-known feature detectors and descriptors. International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 3, 1 (2014) 1-6.
113. Gonzalez, R. C., Woods, R. E. ve Eddins, S. L., Digital image processing using Matlab, Gatesmark Publishing, 2009.
114. von F, Z., Beugungstheorie des schneidenver-fahrens und seiner verbesserten form, der phasenkontrastmethode, physica, 1, 7-12 (1934) 689-704.
115. Kim, W. Y. ve Kim, Y. S., Robust rotation angle estimator, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21, 8 (1999) 768-773.
116. Kim, Y. S. ve Kim, W. Y. Content-based trademark retrieval system using a visually salient feature, Image and Vision Computing, 16, 12-13 (1998) 931-939.
117. Hwang, S. K. ve Kim, W. Y., A novel approach to the fast computation of Zernike moments, Pattern Recognition, 39, 11 (2006) 2065-2076.
118. Maofu L., Yanxiang He. ve Bin Ye., Image zernike moments shape feature evaluation based on image reconstruction, Geo-spatial Information Science, 10, 3 (2007) 191-195.
119. NABIYEV, V., Teoriden Uygulamalara Algoritmalar, Seçkin Yayıncılık, ISBN: 978-975-023843-7, Ankara, 2016.
120. Soille, P., Morphological image analysis: principles and applications, Springer Science & Business Media, 2013.

121. Barron, J. L., Fleet, D. J., ve Beauchemin, S. S., Performance of optical flow techniques, International Journal of Computer Vision, 12, 1 (1994) 43-77.
122. Criminisi, A., Perez, P. ve Toyama, K., Object removal by exemplar-based inpainting, In 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Haziran 2003, Madison, USA, IEEE,II-III.
123. Douglas, D. H. ve Peucker, T. K., Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 10, 2 (1973) 112-122.
124. Hough P.V.C., Methods and means for recognizing complex patterns, 1962.
125. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Banka+Hak+kinda/Sikca+Sorulan+Sorular/Emisyon+ve+Banknotlar/>. 22 Mayıs 2019
126. Salman, R. B. M., Goswami, P. ve Paunwala, C. N., Comparative analysis of exemplar based image inpainting techniques, In 2014 2nd International Conference on Emerging Technology, Aralık 2014, Surat, India, IEEE, 1-6.
127. Thanki, B. B., Overview of an image inpainting techniques, International Journal For Technological Research In Engineering, 2, 5 (2015) 388-391.
128. Bertalmio, M., Sapiro, G., Caselles, V. ve Ballester, C., Image inpainting. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Temmuz 2000, ACM Press/Addison-Wesley, 417-424.
129. Panchal, K. A. ve Holia, M., A Survey: Different Techniques of Video Inpainting, International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering (IJIRCCE), 2, 2(2014) 2923-2928.
130. NABIYEV, V. V., TAŞÇI, A. ve ULUTAŞ, M., Removing unwanted objects from an image, In 2011 IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Nisan 2011, IEEE, 9-12.
131. Yuanji, W., Jianhua, L., Yi, L., Yao, F. ve Qinzhong, J., Image quality evaluation based on image weighted separating block peak signal to noise ratio, In International Conference on Neural Networks and Signal Processing, Proceedings of the 2003, Aralık 2003, IEEE, 994-997.
132. Muja, M. ve Lowe, D. G., Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration, International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISAPP 2009), Şubat 2009, Lisboa, Portugal, Springer, 331-340.
133. Otsu, N., A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9, 1 (1979) 62-66.

ÖZGEÇMİŞ

Seçkin YILMAZ; 1985 yılında Tokat'ın Erbaa ilçesinde doğdu. İlk öğrenimini 1996 yılında Belediye İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Orta ve lise eğitimini Yılmaz Kayalar Anadolu Lisesi'nde 2003 yılında tamamladı. 2008 yılında Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği bölümünü bitirdi. 2011 yılında Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisansını tamamladı. 2015 yılında ise Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği'nde Lisans Tamamlama eğitimi bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmalarına başladı.

Doktora çalışması esnasında, 2 SCI indeksli dergilerde ve 1 uluslararası sempozyumda yayınlar yapmıştır. Uluslararası sempozyumda sunulan bildirisi en iyi çalışma ödülünü almıştır.

SCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Yılmaz S., Nabiye V.,” Solving Double-Sided Puzzles: Automated Assembly of Torn-up Banknotes Evidence”, Journal of Forensic Sciences, 2019. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13993>

Nabiye V., Yılmaz S., Günay A.,Muzaffer G.,Ulutaş G., “Shredded banknotes reconstruction using AKAZE points”, “, Forensic Science International, pp vol 278 , pp.:280-295, Uluslararası Bildiriler

Uluslararası Bildiriler

Yılmaz S.,Nabiye V., “Reconstruction of Fragmented Frescoes Using Keypoint Based Methods”, I.International Scientific Practical Conference «APPLIED ISSUES OF EXACT SCIENCES» - APIES '17 , 2017 2017.