

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARKEOLOJİK PARÇALANMIŞ NESNELERİN GÖRÜNTÜ
İŞLEME VE GEOMETRİK YÖNTEMLERLE
BİRLEŞTİRİLMESİ

GÜREL YILDIZ

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARKEOLOJİK PARÇALANMIŞ NESNELERİN GÖRÜNTÜ
İŞLEME VE GEOMETRİK YÖNTEMLERLE
BİRLEŞTİRİLMESİ

GÜREL YILDIZ

Prof. Dr. Nevcihan Duru
Danışman, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Sayar
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan Burak İner
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Tuğba Dalyan
Jüri Üyesi, İstanbul Bilgi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nur Banu ALBAYRAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.02.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Gürel Yıldız

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemim tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim. Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Gürel Yıldız

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada arkeolojik kazılar sonucunda ortaya çıkan parçalanmış iki boyutlu kalıntı nesnelerinin dijital görüntüleri ve farklı içerikte sentetik görüntülerin doğru eşleştirilerek gerçek nesnenin oluşturulabilmesi için; parçaların dijital görüntüleri üzerinden görüntü işleme, geometrik yöntemler ve yapay zeka algoritmalarından uygulamalı evrimsel sinir ağları ve graf algoritmaları kullanılarak yeni yaklaşımlar önerilmiştir. Geliştirilen yazılım uygulaması ile iki boyutlu parça görüntüleri üzerinde görüntü edinme, görüntü kenar bölümleme, özellik çıkarma, ikili eşleme ve görüntü genel bileşimi işlemleri uygulanmıştır. Uygulama girdi ve çıktıları farklı şekilde parça görüntüleri kullanılarak doğru eşleştirme ve zaman kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

Doktora tez dönemi boyunca değerli yorum ve katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Nevcihan Duru 'ya, Prof. Dr. Ahmet Sayar 'a, Doç. Dr. Tuğba Dalyan 'a, Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan Burak İnnar 'e ve Dr. Öğr. Üyesi Nur Banu ALBAYRAK 'a teşekkürlerimi sunarım.

Arkeolog ve Restoratör Tarık Güçlütürk 'e tez konusu ile ilgili değerli yorum ve katkıları için teşekkür ederim.

Evrende nerede olursam olayım zamandan bağımsız her zaman varlıklarını ve desteklerini hissettiğim Annem Fatma Yıldız 'a ve kardeşlerime, tezin hazırlanmasında bütün sıkıntılarıma katlanan ve benim uzayımı genişleterek bana yeni boyutlar katan değerli eşim Çiğdem Yıldız ve kızım Sare İpek Yıldız 'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca arkadaşım Cenk Mola 'ya fiziksel donanım ve bilgi desteği için teşekkür ederim.

Ocak – 2024

Gürel YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	13
3.1. Görüntü Edinme	14
3.2. Görüntü Kenar Bölümleme	21
3.3. Özellik Çıkarma.....	25
3.4. İkili Eşleme.....	27
3.4.1. Geometrik Yöntem	28
3.4.2. DELF ve RANSAC ile Geliştirilmiş Yöntem.....	40
3.4.3. Yapay Zeka Algoritması ile Geliştirilmiş Yöntem.....	42
3.5. Görüntü Genel Bileşimi.....	46
3.6. Görüntü Genel Bileşim Sonucunun Değerlendirilmesi	51
3.6.1. Ortalama kare hatası.....	51
3.6.2. Yapısal benzerlik indeksi ölçüsü	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Apollonia-Arsuf arkeolojik bölgesinde çıkartılan seramik parçaları	4
Şekil 2.2. Yapboz parçaların ve kırık eserler parçalarının eşleştirilmesi	7
Şekil 2.3. Görüntü birleştirme metodu	8
Şekil 2.4. Diziler ile görüntü birleştirme metodu	9
Şekil 2.5. Görüntü yeniden birleştirme algoritması ardışık düzeni	10
Şekil 2.6. Giren parça verileri, sonuç ve gerçek görüntü	10
Şekil 2.7. Kullanılan Evrişimli Sinir Ağının seçilen mimarisinin bir örneği	11
Şekil 3.1. Uygulama sistemi	13
Şekil 3.2. Görüntü Edinme ve Görüntü Kenar Bölümleme adımlarının detayları	14
Şekil 3.3. Hazırlanan fotoğraf çekme ortamı	15
Şekil 3.4. Fotoğraf çekim kutusu bölümleri	15
Şekil 3.5. Görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılan resimli kağıt parçaları	16
Şekil 3.6. 3x3 Gauss kernel	17
Şekil 3.7. Kağıt yırtım atık bölümleri ve temizlenmiş görüntü	17
Şekil 3.8. Gerçek dijital görüntü	19
Şekil 3.9. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 3 parçalı görüntü örnekleri	19
Şekil 3.10. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 4 parçalı görüntü örnekleri	19
Şekil 3.11. 4 parçalı mozaik görüntü örnekleri	19
Şekil 3.12. 2 parçalı yapboz görüntü örnekleri	20
Şekil 3.13. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 9 parçalı görüntü örnekleri	20
Şekil 3.14. Gri ölçeğe dönüştürülmüş görüntü	22
Şekil 3.15. Görüntü üstünde mavi renkli dış kontur	22
Şekil 3.16. Douglas-Peucker algoritmasının eğri üzerinde adımları	23
Şekil 3.17. Birinci görüntü üzerinde kırmızı çokgen kenar köşeleri	24
Şekil 3.18. Görüntü kenar alt parçası	24
Şekil 3.19. (a) Birinci görüntü alt parçası (b) İkinci görüntü alt parçası	24
Şekil 3.20. Görüntüler üzerinde belirlenmiş kenar alt parçaları ve adlandırmaları	25
Şekil 3.21. Belirlenen kontur piksellerinin beyaz renk ile gösterimi	25
Şekil 3.22. Görüntü parçalarının kontur pikselleri etrafındaki taranan bölümleri	26
Şekil 3.23. Görüntülerin alt parçalarının piksel renklerinin histogram dağılımları	26
Şekil 3.24. İki parçanın kontur renk benzerlik hesaplama algoritması	27
Şekil 3.25. Görüntülerin alt kenar parçaları	27
Şekil 3.26. Görüntü kenar doğru parçası	28

Şekil 3.27. Parça uç noktaları arasında çizilen doğru parçası	29
Şekil 3.28. Parçaların orta noktası üzerinde kaydırılmış görüntüsü	29
Şekil 3.29. Parçaları orta noktalarına göre kaydırma algoritması	29
Şekil 3.30. Kenar doğru parçaları arasındaki açı	30
Şekil 3.31. Hesaplanan açı kadar döndürülmüş kenar parçaları	30
Şekil 3.32. Aynı yönde olan kenar parçaların üst üste gelmesi durumu	31
Şekil 3.33. Görüntü kenar parçalarının yönleri	31
Şekil 3.34. Görüntü kenar alt parça orta noktalarının dış kenarlara uzaklığı	32
Şekil 3.35. Kenar yön ve dönme açısı kümesi belirleme algoritması	32
Şekil 3.36. Görüntü kenarının düz doğru parçası	39
Şekil 3.37. İki görüntü arasında eşleşen noktalar	41
Şekil 3.38. Eksik kenarlı görüntülerde eşleşen noktalar	42
Şekil 3.39. CNN Sınıflandırma Modeli	44
Şekil 3.40. Model doğruluk ve doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması	45
Şekil 3.41. Geometrik yöntem ile eşleme sonucu elde edilen görüntü çıktıları	45
Şekil 3.42. CNN Modeli ile elde edilen sınıflandırma sonuçları	46
Şekil 3.43. Bağlantılı eşleşen ikili sıralaması algoritması	48
Şekil 3.44. Üç parça görüntü eşleşme listesinin yönlü graf gösterimi	49
Şekil 3.45. Öteleme koordinatlarının döndürülmesi	49
Şekil 3.46. Görüntü Genel Bileşimi sonucunda elde edilen görüntü	51
Şekil 4.1. Parça görüntülerinin eşleşme sonuçları	54
Şekil 4.2. CNN ile parça eşleştirme sonuçlarının sınıflandırılması	55
Şekil 4.3. Dokuz parça görüntü eşleşme listesinin yönlü graf gösterimi	55
Şekil 5.1. İki kağıt parçasının doğru eşleşen görüntüsü	60
Şekil 5.2. İki tane yapboz parçasının görüntü genel bileşimi	61
Şekil 5.3. Kenarları bozulmuş görüntü eşleştirmeleri	61
Şekil 5.4. Kenarları arasında boşluk olan parçaların bileşimi	61
Şekil 5.5. Dört tane mozaik parçasının görüntü genel bileşimi	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. İki boyutlu görüntüler için bilgisayar destekli yöntemler	5
Tablo 2.2. Bilgisayar destekli yöntem adımları.....	6
Tablo 3.1. Ön işlem uygulanan görüntü ve sonuçları.....	18
Tablo 3.2. Görüntü örneklerinin özellikleri.....	21
Tablo 3.3. Birinci ve ikinci parça görüntülerinin karşılaştırılan alt kenar eğrileri	35
Tablo 3.4. Birinci ve ikinci parçaların karşılaştırılan alt kenarların eşleşme durumu.....	36
Tablo 3.5. Parçalı görüntülerin yanlış eşleşme sonucu	38
Tablo 3.6. Parçalı görüntülerin doğru eşleşme sonucu.....	39
Tablo 3.7. Maske uygulanmış görüntüler.....	41
Tablo 3.8. Eşleşme sonucu elde edilen sonuçlar	47
Tablo 3.9. Parça görüntülerinin dijital çizimi.....	50
Tablo 3.10. Ortalama Kare Hatasına göre sonuçlar.....	52
Tablo 3.11. Yapısal benzerlik indeksi ölçüsüne göre sonuçlar	53
Tablo 4.1. Farklı çalışma sonuçları	54
Tablo 4.2. Dokuz parça görüntüsünün dijital çizimi	56
Tablo 4.3. Geliştirilen Uygulama sonucu ile diğer sonuçlar	58
Tablo 5.1. Farklı parça sayısına göre sonuç değerleri	59
Tablo 5.2. Dört parça görüntüsünün dijital çizimi.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ	: Görüntü kenar parça doğruları arasındaki açı
GHz.	: Giga Hertz

Kısaltmalar

Conv	: Convolutional Layers (Evrişimsel Katmanlar)
DELF	: DEep Local Feature (Derin Yerel Özellik Çıkarımı)
FC	: Fully Connected Layer (Tamamen Bağlantılı Katmanlar)
CNN	: Convolutional Neural Network (Evrişimli Sinir Ağları)
GAN	: Generative Adversarial Networks (Çekişmeli Üretici Ağ)
K-NN	: K-Nearest Neighbors Algorithm (K-En Yakın Komşular Algoritması)
MSE	: Mean Squared Error (Ortalama Hata Karesi)
M.Ö.	: Milattan Önce
RANSAC	: RANdom SAmple Consensus (Rastgele Örnek Konsensus)
ReLU	: Rectified Linear Unit (Doğrultulmuş Doğrusal Birim)
SSIM	: Structural Similarity Index (Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçüsü)
Wifi	: Wireless fidelity (Kablosuz İnternet Ağı)

ARKEOLOJİK PARÇALANMIŞ NESNELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME VE GEOMETRİK YÖNTEMLERLE BİRLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Arkeolojik kazılarda çıkarılan kırık parçaların yeniden birleştirilmesi ve oluşturulması işlemleri arkeologlar ya da restoratörler tarafından el ile yapılmaktadır. Arkeologlar ve restoratörler bu işlem sırasında; kazılarda çıkan kalıntı nesnelerinin parçacık sayısındaki fazlalık, parçacıkların çeşitliliği, eksik ve deforme olmuş parçacıklar, deneme yanılma ile parçacıkların eşleştirilmesi işlemleri, yapıştırıcı ile yanlış birleştirme işlemlerinde parçaların geri ayrılamaması sorunlarıyla karşılaşmaktadırlar. Arkeolojik kazılarda çıkarılan kalıntılar iki boyutlu olarak duvar resmi, papirüs kâğıdı ve resimli çiniler gibi nesnelerin parçaları ya da üç boyutlu olarak sütun, mezar taşları ve küpler gibi nesne örnekleri ile sınıflandırılabilir.

Bu tez çalışmasında görüntü işleme, geometrik yöntemleri, yapay zeka yöntem ve algoritmaları kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar uygulaması ile arkeolog ve restoratörlerin; iki boyutlu kırık kalıntı parçalarını süre ve harcanan emek açısından kazanım ile doğru eşleştirerek birleştirmelerini sağlamaya yardımcı olmak hedeflenmiştir.

Tez kapsamında, sentetik parçalanmış iki boyutlu görüntüler ve fotoğraf çekim ortamıyla dijitale aktarılan parça görüntüleri üzerinde eşleştirmelerde geliştirilen bilgisayar uygulaması vasıtasıyla parça görüntülerinin eşleştirilmesinde ve gerçek görüntünün oluşturulmasında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arkeolojik Kalıntı Görüntüleri, Geometrik Yöntemler, Görüntü Eşleştirme, Görüntü İşleme, Yapay Zeka Algoritmaları.

ASSEMBLING ARCHAEOLOGICAL FRAGMENTED OBJECTS WITH IMAGE PROCESSING AND GEOMETRIC METHODS

ABSTRACT

The reassembly and composition of the broken pieces excavated in archaeological excavations are done manually by archaeologists or restorers. During this process, archaeologists and restorers encounter the problems of excess number of particles, diversity of particles, missing and deformed particles, matching of particles by trial and error, and inability to separate the parts in wrong bonding processes with adhesive. Remains unearthed in archaeological excavations can be classified as two-dimensional fragments of objects such as wall paintings, papyrus paper and illustrated tiles, or three-dimensionally by examples of objects such as columns, tombstones and jars.

In this thesis, with the help of a computer application developed by using image processing, geometric methods and artificial intelligence methods and algorithms, it is aimed for archaeologists and restorers to ensure that the two-dimensional broken residue pieces are matched correctly with the gain in terms of time and effort.

Within the scope of the thesis, accurate results have been obtained by means of a computer application developed for matching on synthetic fragmented two-dimensional images and the fragment images transferred to digital with the photo taking system.

Within the scope of the thesis, successful results have been achieved in matching part images and creating the original image through the computer application developed for matching synthetic fragmented two-dimensional images and part images digitally transferred by photo taking system.

Keywords: Archaeological Fragment Image, Geometric Methods, Image Matching, Image Processing, Artificial Intelligence Algorithms.

1. GİRİŞ

Tez önerisi ön hazırlık çalışmalarında görüşülen, İstanbul Arkeoloji Müzeleri'nde Arkeolog ve Restoratör olarak görevli Tarık Güçlütürk 'ün arkeolojik parçaların birleştirilmesi sürecinde karşılaştıkları sorunlar ile ilgili düşünceleri aşağıdaki gibidir;

- Eserlerin tümlemesine yönelik olarak parçaların taranarak bilgisayar ortamına aktarılması özellikle çok parçalı seramik eserlerin tümlemesinde bir yöntem olarak düşünülmektedir. Özellikle parçalara asgari düzeyde el değerek yağ, kir ve asit gibi ürünlerin eser üzerine aktarımını minimuma indirmek açısından önemlidir. Bu yöntemle daha fazla restoratör bilgisayar ortamında eşleşen parça arayabilir ve tek bir restoratör eşleşen parçaları tek bir dokunuşla yapıştırabilir.
- Diğer önem teşkil eden bir konu, yapılan alçı tümlemelerin olduğu yerlerin parçaları, devam eden kazılarda sonradan bulunabilmektedir. Yıllar sonra bulunan bir parçanın alçı ile tümlenmiş alanda denenmesi mümkün olamamaktadır. Bilgisayar ortamınızdaki eski veriler aracılığı ile bu eşleşme kolaylıkla yapılabilir ve alçının yerinden çıkarılıp eşleşen parçanın yerine yerleştirilmesi kararı alınabilir.

Arkeolojik buluntular, antik mezarlarda ve kalıntılarda binlerce yıldır uyuduğu için; kazı çalışmaları sırasında bir miktar hasar görmüştür ve bunların çoğu arkeolojik ve kültürel değeri yüksek olan sanat eserleridir. Bu ayrıntılı nesnelerin belli bir dereceye kadar toparlanması, farklı kültür ve geçmiş uygarlıkları anlamada ve bilgi edinmede önem taşır. Ayrıca, en yeni geliştirilmiş multimedya teknolojisini kullanarak kalıntıların gösterilmesi ve sergilenmesine arkeoloji bilimi açısından önemli bir adımdır. Bir arkeolog zarar gören parçayı aramaya, orijinal şeklini hayal etmeye ve geçmiş zamanlarda görünümünü geri döndürmek için parçaları birleştirmeye ihtiyaç duyar. Antik kalıntılar kil, seramik, çini, metal, ahşap, tekstil vb. olabilir. Örneğin kırık bir çini geri oluşturmak için bir arkeolog her parçanın şeklini ve sınırını kontrol etmeli, orijinal görünüşünü tahmin etmeli ve her parçanın tutarlılığını test etmelidir. Arkeolog ya da restoratörün deneyimi, gerekli olan zaman, çok kırılğan parçalardaki bozulmalar, parçaların büyüklüğü ve ağırlığının getirdiği müdahale zorluğu, büyük parçaların birleştirilmesinde ve sabit tutulması için hazırlanması gereken ek malzemeler el ile yapılan klasik yöntemin önemli sorunlarıdır (Palmas ve diğ., 2013).

Çömlekçilik arkeolojideki en yaygın bulgulardır, çünkü seramikler insanlık tarafından binlerce yıldır günlük yaşamda kullanılmıştır. Arkeologlar tarafından bulunan seramik parçalarına kısaca çanak çömlek parçaları denir. Bu çanak çömlekler, zeminler ve duvarlar için dolgu malzemesi olarak kullanılmış veya çöp çukurlarına atılmıştır. Bu nedenle zaman dilimleri ve kültürel gruplar bağlamında katmanlarda on binlerce çanak çömlek bulunur. Ayrıca çanak çömlek parçaları kültürlerin nüfus hareketleri, bölgelerarası temaslar, üretim bağlamı ve teknik veya işlevsel kısıtlamalar hakkında bilgi vermektedir. Bu on binlerce parçanın dokümantasyonu, sınıflandırılması ve yayınlanması arkeologlar için önemli bir görevdir (Mara, 2016). Birçok çok önemli arkeolojik nesnenin parçalanmış ve çoğunlukla yüzlerce hatta binlerce parçada ortaya çıktığı bilinmektedir. Orijinal nesneyi meydana getiren kırık parçalardan yeniden yapılandırma(birleştirme) problemi; arkeologlar ve restoratörler için kural olarak çok sıkıntılı, sıkıcı ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu nesnelerin çok önemli bir sınıfı, Akrotiri, Thera, Mycenae veya Tiryntha 'da Yunanistan'da kazılmış olanlar gibi M.Ö. 1100 yıllarına tarihlenen duvar resimleridir. Tam olarak yeniden yapılandırılması ciddi zorluklarla karşı karşıya olan kazılarda çıkarılan on binlerce parçadan oluşan; on yıllarca kırılmış ve korunmamış ama önemli arkeolojik değeri olan çok sayıda duvar resimleri yer almaktadır (Papaodysseus ve diğ., 2008).

Arkeologlar ya da restoratörler tarafından yapılan yeniden oluşturma süreci dört aşamadan oluşur:

1. Görsel parça analizi
2. Eşleşen varsayımları tasarlamak
3. Gerçek parçaları üzerinde bu varsayımları prova yapma ve çapraz karşılaştırma
4. Öngörülen yeniden yapılandırma varsayımına göre bitişik parçaların birleşimi

Yeniden her bir nesnenin oluşturma evresi; el ile çalışmanın zorluğu ile ilgili olan birkaç sorunu ortaya koyar. Aslında eşleme işlemi, her bir aday eşleme çiftinin el ile kontrol edilmesiyle yürütülür. Bundan dolayı; parçaları geçici bir geniş çaplı rekombinasyon düzenine göre düzenlenmesi ve restoratörün değerlendirmesini desteklemek için bir destekleyici yapının tasarımını gerektirmektedir (Palmas ve diğ., 2013).

Bir diğ er çalışmada; arkeologlar tarafından manuel olarak elde edilen 935 adet parça kırıntı izi kullanılmıştır ve 104 tekerlek sübjektif olarak sınıflandırılmıştır. Desen baskısını elde etmek için üç adım uygulanmıştır: Modelleme kili ile kalıplama, negatif dekorun elde edilmesi için modelleme kilinin m rekkeplenmesi ve dijital bir sürüm elde etmek için desenin taranması ve vektöre dönüştürülmesidir. Bu yöntem verimliliğini kanıtlamışsa da giderek artan parça  rneği boyutuyla uygulama sınırlarına ulaşır. Nitekim 2009 'dan 2012 'ye kadar yapılan son kazılar sırasında bu çıkarılan parça  rneği büyüklüğü yaklaşık 38.000 parçaya ulaşmıştır. Bu nedenle, hızlı bir analiz için arkeoloğun uzmanlığı tarafından yönlendirilen yeni bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir (Teddy ve diğ., 2015).

Arkeologların geri dönüştürme sürecinde karşılaştıkları diğ er güçlükler şunlardır:

1. Parçaların kombinasyonlarının belirlenmesinde belirsizlik,
2. Deneme yanılma ile bir birleştirme testinde parçacıkların ağırlığı,
3. Geri dönüştürme sürecinde parçaların yapıştırılmasından sonra geri d n şs zl ğ d r.

Aynı zamanda, uzun süre ortaya çıkarılamayan bir kalıntı, yüzeyindeki boyalı orijinal pigmentini kaybedebilir. Arkeologlar için, solgun veya düşmüş eski renkleri yeniden  retebilmelerinde diğ er çalışmalarından ve problemlerinden biridir (Zheng ve diğ., 1998).

Tez çalışmasının temel amacı iki boyutlu kalıntı parça görüntülerini kullanarak gerçek nesneye göre kalıntı parçalarını doğru eşleştiren uygulamanın geliştirilmesidir. Bu amaç kapsamında parçaların dijital görüntülerinin oluşturulması, görüntülerin hazırlanması, görüntülerden özellik çıkarımı, görüntüler arasındaki benzerlik ölçülmesi, en iyi eşleşen parçalara karar verilmesi ve görüntü genel bileşimi işlemlerinin gerçeklenmesi hedeflenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Eski çağlarda insanlar tarafından yapılmış toprak üstünde, toprak altında veya su altında bulunan, gözle görülen, elle tutulan her eseri dikkatle ve titizlikle ortaya çıkaran, bunları inceleyen, açıklayan ve yorumlayan ve bu doğrultuda eski insanların nasıl yaşadığını bilen arkeoloji bilim uzmanı Arkeolog ‘tur. Bir arkeolog Şekil 2.1’deki gibi parçalanmış ve zarar görmüş kalıntı parçalarını aramaya, orijinal şeklini hayal etmeye ve geçmiş zamanlarda görünümünü geri döndürmek için parçaları birleştirmeye ihtiyaç duyar (Willis, 2008).



Şekil 2.1. Apollonia-Arsuf arkeolojik bölgesinde çıkartılan seramik parçaları

Arkeologlar ve restoratörler için 2 boyutlu arkeolojik kalıntı parçalarının yeniden oluşturmada karşılaşılan problemler; parçaların konturları arasında uyuşma, aslında komşu olan parçalar arasındaki bölge sınırındaki devamlılık, renk devamlılığı, tematik içeriğin devamı, çatlak devamıdır. Literatürde bu sorunlara çözüm önerileri olarak;

Şeçkin ve Vasif bulmaca problemlerini çözme konusunda yüzden fazla çalışmayı inceleyerek kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada arkeolojik kalıntı görüntüleride bir yapboz çeşiti olarak tanımlanmıştır. Bu araştırmaya göre bilgisayar destekli yöntemlerle çözülmeye çalışılan bazı iki boyutlu bulmaca problemlerinin bilgisayar destekli yöntem, eşleştirme yöntemi, yapboz türleri açısından gruplanması Tablo 2.1’de detaylı gösterilmiştir (Yılmaz ve Nabiyeve, 2023). Bilgisayar destekli yöntemlerden referans görselleri kullanmadan yaklaşımında parçaların bileşiminden önce orijinal nesne görüntüleri bilinmemektedir. Bu durumda parçalar şekil tabanlı, içerik bazlı, şekil ve içerik bazlı birlikte eşleştirme yöntemleri ile karşılaştırılmışlardır. Parçalar

tek taraflı, resimsel, düzenli ve düzensiz şekil tiplerinden oluşan yapbozlar, kırık eserler ve kırık seramik parçalarıdır. Referans görseli kullanılan çalışmalarda görüntü desen tanıma ve anahtar noktaya dayalı eşleştirme yöntemleri tek ya da çift taraflı, resimli ve düzensiz şekilli yırtık kağıt paralar ve kırık fresk parçaları bileştirilmiştir.

Tablo 2.1. İki boyutlu görüntüler için bilgisayar destekli yöntemler

Bilgisayar destekli yöntemler	Eşleştirme yöntemleri	Yapboz türleri	Örnekler
Referans görselleri kullanmadan	Şekil tabanlı	Tek taraflı, resimsel ve geleneksel şekil tipi	Kanonik yapboz bulmacaları
		Tek taraflı, resimsel ve düzenli şekil tipi	Dikdörtgen/kare paketleme bulmacası
		Tek taraflı, düzensiz şekil tipi	Kırık eserler
	İçerik bazlı	Tek taraflı, resimli ve geleneksel şekil türü	Kanonik yapboz bulmacaları
		Tek taraflı, resimli ve normal şekil tipi	Kenar eşleştirme bulmacaları
		Tek taraflı, resimli ve düzensiz şekil tipi	Kırık seramikler
	Şekil ve İçerik bazlı	Tek taraflı, resimli ve geleneksel şekil türü	Kanonik yapboz bulmacaları
	Şekil ve İçerik bazlı	Tek taraflı, resimli ve düzensiz şekil tipi	Kırık seramikler
Referans görsellerini kullanma	Desen Tanıma tabanlı	Tek taraflı, resimli ve düzensiz şekil tipi	Kırık freskler
	Anahtar noktaya dayalı	Çift taraflı, resimli ve düzensiz şekil tipi	Yırtık kağıt paralar

Bilgisayar destekli yöntemlerde izlenen giriş görüntülerinin edinilmesi, özellik çıkarma, eşleştirme, küresele tutarlılığın sağlanması ve parçaların birleştirilmesi adımları ve kullanılan yöntemler referans görseli kullanan ve kullanmayan uygulamalar olarak Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Giriş görüntülerinin edinilmesi aşamasında görüntü tarayıcı

kullanılarak nesnelerin görüntüleri dijital ortama iki boyutlu olarak aktarılmıştır. Özellik çıkarma aşamasında referans görselleri kullanmayan bilgisayar destekli yöntemler olarak şekil tabanlı yöntemler veya içerik tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Eşleştirme aşamasında parçaların şekil veya içerik özellikleri kullanılarak ve parça görüntüleri üzerlerindeki desen ya da anahtar nokta özellikleri kullanılarak eşleştirilmiştir.

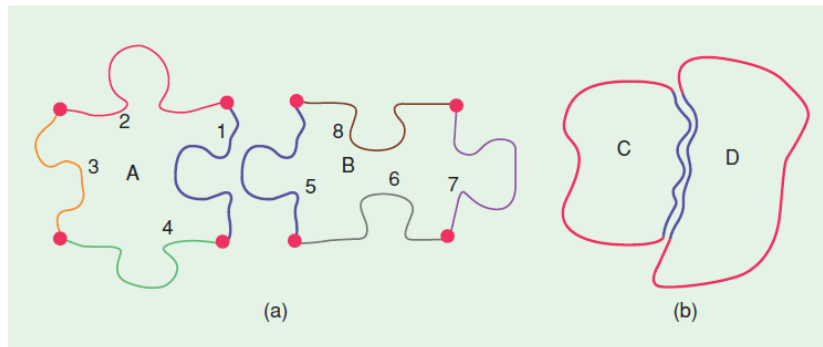
Tablo 2.2. Bilgisayar destekli yöntem adımları

Adım Adı	Referans görselleri kullanmayan bilgisayar destekli yöntemler	Referans görsellerini kullanan bilgisayar destekli yöntemler
Giriş görüntülerinin edinilmesi	Tarayıcı	İnternet Tarayıcı
Özellik çıkarma	Şekil tabanlı yöntemlerde özelliklerin çıkarılması İçerik tabanlı yöntemlerde özelliklerin çıkarılması Şekildeki özelliklerin çıkarılması ve içerik tabanlı yöntemler	Desen tanıma Anahtar noktaya dayalı yöntemler
Eşleştirme	Parçaların şekil ve/veya içerik özellikleri birbirleriyle eşleştirilmiştir.	Parçalar, desen veya anahtar nokta özellikleri kullanılarak referans görüntüyle eşleştirilir.
Küresel Tutarlılığın Sağlanması	Eşleşen çiftlerin uyumluluğunu en üst düzeye çıkarma Belirsiz eşleşmelerin ortadan kaldırılması	Parçalar ile referans görseller arasındaki eşleşme uyumluluğunun en üst düzeye çıkarılması ve belirsiz eşleşmelerin ortadan kaldırılması
Parçaların birleştirilmesi	Küresel olarak eşleşen parçalar, ulaşılan sonuca kadar birleştirilir.	Referans görselle genel olarak eşleşen parçalar, nihai sonuca ulaşıncaya kadar boş çerçeve içerisinde birleştirilir.

Bileştirilen parçaların yanlış açıda ya da konumda eşleştirilmesinden dolayı oluşan genel görüntüde orijinale göre bozulmalar olabilir. Küresel tutarlılığın sağlanması aşamasında ve parçaların bileştirilmesi aşamasında bu belirsizlikler ortadan kaldırılmıştır. Parçaların birleştirilmesi aşamasında önceki aşamalarda hazırlanan eşleşen parçalar belirlenen eşleşme sırasına göre sonuca kadar birleştirilir.

Nada ve Md Jan'ın sınıflandırma ve yeniden yapılanma yöntemleri üzerine araştırmasına göre 2014 yıllarına kadar yapılan çalışmalarda özellik olarak kontur, renk, tematik içerik ve geometrik içerik; sınıflandırma tekniği olarak kullanıcı etkileşimi, ilişki katsayısı ve en küçük kareler farkı kullanıldığı; bunun yanında desen için K-En yakın komşular algoritması(K-NN) ve bulanık kümeleme algoritmaları kullanılmıştır (Rasheed ve Nordin, 2015).

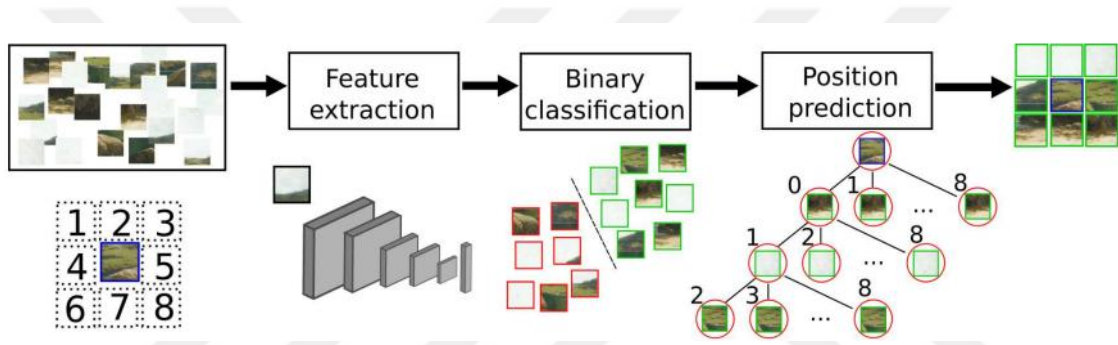
Yapboz parça görüntülerinin yeniden birleştirilmesi ile bozulmuş arkeolojik kalıntıların yeniden birleştirilmesi arasındaki farklar; Şekil 2.2'de (a) yapboz parça görüntülerinde çokgen köşeleri ve benzer kenar eğri parçaları vardır ama (b) bozulmuş arkeolojik kalıntı parça görüntülerinde çokgen köşelerinin tanımlanması ve benzer eğri parçaları çeşitlilik göstermektedir (McBride, 2002). Bir sınır eğrisi parçası başka sınır eğrisi parçası ile farklı konumlardan eşleşme durumları çıkabilmektedir.



Şekil 2.2. Yapboz parçaların ve kırık eserler parçalarının eşleştirilmesi

Paumard, Picard and Tabia dijital görüntü üzerinde kırpma işlemi uygulayarak eşit ve düz kenarlı örnekler ile çalışmalarını gerçekleştirmişler. Bir parçanın diğerine göre göreceli konumunu tahmin edebilen bir sınıflandırıcı geliştirmeyi önermişlerdir. Sırasız bir parça listesinden yeniden birleştirme problemini çözmenin, dikkatlice tasarlanmış bir grafikte en kısa yol problemi olarak ifade edilebileceğini göstermişler. Parçaların konumlarını belirlemek için her bir parçanın sınırlarını göz ardı ederek içeriğe odaklanmışlardır.

Geliştirdikleri metod Şekil 2.3'te gösterilen özellik çıkarma, ikili sınıflandırma ve konum tahmini adımlarından oluşmaktadır (Paumard ve diğ., 2018). Merkezi bir parçayı önceden referans parça olarak belirleyerek, görüntüyü yeniden birleştirmek için doğru hizalama adımı yapılmıştır. Tüm fragmanların özellikleri çıkarılmış ve bunlar merkezi fragmanın özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre hangi parçaların görüntünün parçası olduğu tahmin edilmiştir. İlk sekiz parçanın merkezi referans parçaya göre göreceli konumlarını tahmin edilmiştir. Daha sonra görüntüyü yeniden oluşturmak için en kısa yol algoritmasını çalıştırılmıştır. Bu çalışmada parçalar eşit uzunlukta kare kenarlardan oluşmaktadır ve metod girdisi olarak ortadaki parçanın bilinmesi gerekmektedir.

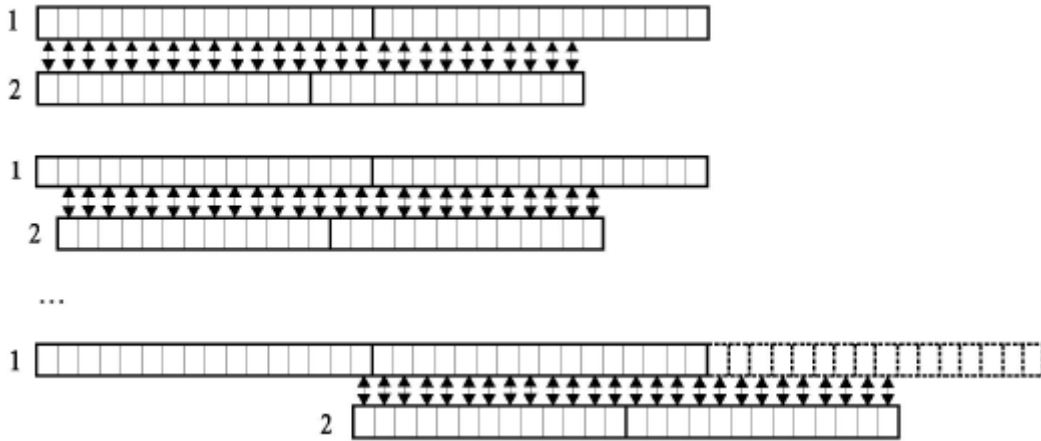


Şekil 2.3. Görüntü birleştirme metodu

Gur ve Ben-Shahar çalışmalarında tuğla duvar bulmacası çözmek için farklı boyutlara sahip olabilen ve bitişik kenarları boyunca isteğe bağlı olarak yan yana yerleştirilebilen düz kenarlı dikdörtgen parçalar kullanmışlar. Çalışmalarında tuğla duvar bulmacalarında parçalar dikdörtgendir ve sabit genişliğe sahiptirler ancak aynı zamanda farklı yüksekliğe sahip olabildiğinden bu tarz parçaların geometrik olarak birbirleriyle birleştirilmesi; köşelerde birleşen kare parçalardan daha karmaşık olduğu belirtilmiştir (Gur ve diğ., 2018).

Bir diğer çalışmada parça görüntülerinde en iyi kısmi eşleşmeyi bulmak için parça görüntüsünün dış kontur özelliklerini veya görsel ipuçlarını kullanılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Önceki algoritmalarında iki komşu parçanın en iyi eşleşen özelliklerini tahmin etmede zayıf olduğunu göz önünde bulundurarak, uzunluk ve özellik sonuçlarına dayalı olarak birinci kontur üzerindeki bir noktayı ikinci kontur üzerindeki belirlenen bir hedef nokta ile eşleşme benzerliği değerini ölçerek eşleştirme yaklaşımında bulunmuşlardır (Zhang ve diğ., 2016).

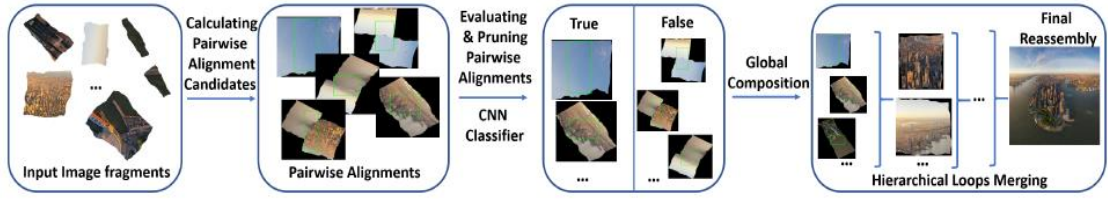
İki parça görüntüsünden çıkarılan kenar eğri döngüsü tarafından paylaşılan en uzun ortak alt dizileri bulmak için, her bir parçanın konturu bir eğri döngüsü olarak çıkarılmış ve eşleştirme gerçekleştirilmiştir. Ama sağlam ve kırık bölgeler arasındaki ayrım ve bunların hizalanması parçalar küçük olduğunda çok zordur ve özellik çıkarından sonra, parçalardan elde edilen eğri eşleşmeleri, bir görüntü kenar eğri döngüsünden çok daha karmaşıktır. (Zhang ve diğ., 2015). Amigoni, Gazzani ve Podico çalışmalarında iki parçanın yeniden birleştirilmesi, nihai görüntünün herhangi bir bilgisine dayanmadan, parçaların ana hatlarından ve renk içeriklerinden çıkarılan bilgilere dayandığını belirterek iki parçanın analizi ve temsillerinin çıkarılması için uygulanan metot da bir parça görüntüsü koordinatlar, renk ve yerel eğrilik hakkında ilgili bilgilerle birlikte sınır piksellerinin dizisi oluşturulması, ortak alt dizileri belirlemek için iki dizinin karşılaştırılması (benzer yerel eğrilik ve renk içerikleri üzerinde tatmin edici kısıtlamalar ile) ve sınırların aday eşleşen kısımlarını temsil ettiği ortak alt diziler yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmada Şekil 2.4'teki gibi birinci parçanın kenar dizisi ile ikinci parçanın kenar dizilerinin ve alt dizilerin karşılaştırılması gerekmektedir (Amigoni ve diğ., 2003). Parça boyutları arasındaki fark büyüdükçe parça kenar dizileri arasındaki fark büyüyeceğinden karşılaştırma işlemi zaman karmaşıklığını arttırmaktadır.



Şekil 2.4. Diziler ile görüntü birleştirme metodu

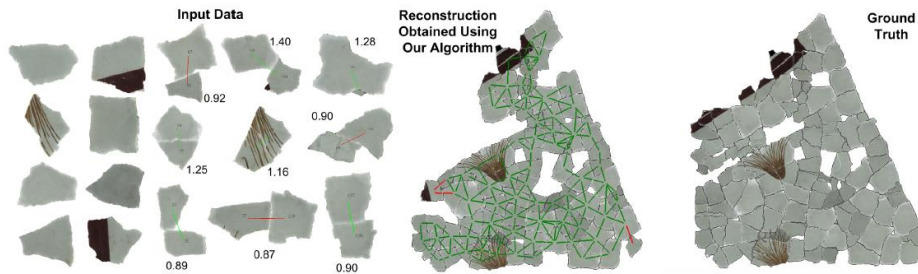
Canyu ve Xin ise Şekil 2.5'te geliştirdikleri görüntü yeniden birleştirme ardışık düzeni uygulamasında giriş görüntü parçalarından ikili uyum adaylarını hesapladıktan sonra ikili eşleştirme yaparak çıkan sonuçlardan doğru ve yanlış eşleşmeleri yapay zeka algoritması konvolüsyonel sinir ağı kullanarak sınıflandırmışlardır. CNN detektörünü eğitmek için, ilk olarak, sentezlenen görüntü parçaları, önce ikili eşleme algoritması kullanılarak

hizalanmıştır. Bu hizalamalar, iki görüntü parçasını birleştirmek için kullanılmıştır. Birleşmiş görüntüler doğru ve yanlış eşleşmeleri içermektedir. Daha sonra, CNN’i eğitmek veya test etmek için bu birleştirilmiş görüntüler örnek kümesi kullanılmıştır. Ağın çıktısı, doğru ve yanlış sınıflandırma olasılığını temsil eden softmax işlevi ile normalleştirilmiştir. Bu olasılığa hizalama puanı olarak tanımlanmıştır. Hizalama puanı belirli bir eşik değerin üstünde olanlar doğru birleşmiş görüntüler ve eşik değerin altında kalanlar yanlış eşleşmiş görüntüler olarak tanımlanmıştır (Le ve Li, 2019). Bu çalışmada kullanılan sentetik girdi görüntü parçaları kenarları üzerinden parçalandığında dört köşeli neredeyse eşit uzunlukta kenar parçalarına bölünmektedir. Bundan dolayı farklı boyutlardaki kenarların karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan zaman karmaşıklığı yer almamaktadır. Çalışmada birleştirilmiş görüntü örneklerinin CNN ile doğru ya da yanlış sınıflandırılmasına odaklanılmıştır. Parçalardan son yeniden birleştirilmiş görüntü oluşturmada orijinal görüntüye göre hata oranını azaltmada eşleşen parçaların bileştirilmesi için algoritma geliştirilmiştir.



Şekil 2.5. Görüntü yeniden birleştirme algoritması ardışık düzeni

Elena ve Thomas çalışmalarında duvar resminin yeniden birleştirilmesinde genetik algoritma geliştirmişler. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi parçalar arasında tahmin edilen ikili eşleşmelerin bir kümesi algoritma girdisi olarak kullanılmıştır.

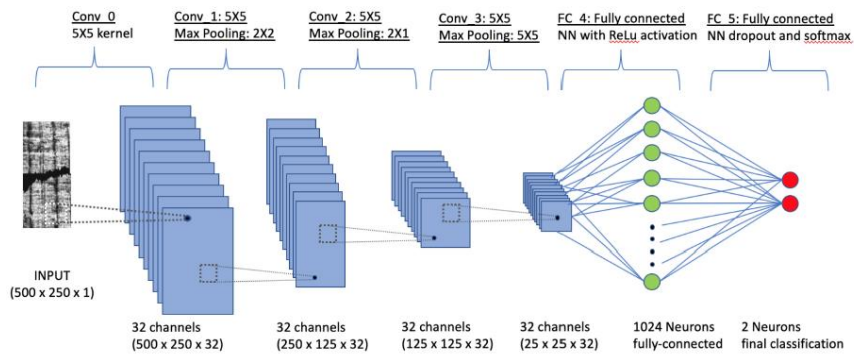


Şekil 2.6. Giren parça verileri, sonuç ve gerçek görüntü

Her eşleşme parça sınırlarını hizalayan bir dönüşüm ve onu diğerlerine göre sıralayan sayısal bir puanla temsil edilmiş ve yüksek puanlı eşleşmelerin, düşük puanlı eşleşmelere göre doğru olma olasılığı daha yüksek olduğu varsayılmıştır. Geliştirilen yöntemin performansı çeşitli küme optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılarak parça sayısı ve zaman açısından sunulmuştur (Sizikova ve Funkhouser, 2018).

Dror, Eli ve Nathan kare şeklinde iki taraflı konumu, yönü ve yüzü farklı yapboz parçalarını birleştirmek için bir genelleştirilmiş genetik algoritma tabanlı çözücü geliştirmişlerdir. Genetik algoritma, bir problemin çözüm alanı içindeki biyolojik doğal seçilime dayanarak optimum sonuç arama yöntemidir. Her nesil 1.000 kromozomdan oluşmaktadır, seçim rulet çarkı seçim yöntemine bağlıdır ve nesil sayısı 30 olan genetik algoritma parametreleri kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonu, her kromozomun kalitesini ve dolayısıyla beklenen çocuk sayısını belirler. Her nesilde tüm kromozomlar seçim amacıyla değerlendirilir. Uygunluk fonksiyonu için farklılık ölçüsü kullanılmıştır. Orijinal görüntüdeki bitişik yapboz parçalarının bitişik kenarları boyunca benzer renkleri paylaşma eğiliminde olduğu, yani kare renk farklılıklarının toplamının minimum değeri, farklılık ölçüsü olarak belirlenmiştir. Test sonuçlarının doğruluğu parça sayısı, komşu parçalarla karşılaştırma ve çalışma süresi parametrelerine göre değerlendirilmiştir (Sholomon ve diğ., 2014).

Roy ve Ilan çalışmalarında antik papirüs parçalarını iplik desenlerine göre eşleştirmek ve hizalamak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Şekil 2.7'deki Evrişimli Sinir Ağı modelini kullanarak tüm parça çiftlerini eşleştirme zorluğunu, bitişik parçalardaki yerel kenar karelerini eşleştirme problemine indirgemişlerdir (Abitbol ve diğ., 2021).



Şekil 2.7. Kullanılan Evrişimli Sinir Ağı'nın seçilen mimarisinin bir örneği

Dariush, Luca, Paolo ve Emanuele çalışmalarında iki boyutlu görüntülerden arkeolojik çömlek parçalarının yeniden oluşturulmasında dalgacık dönüşümü kullanmışlardır. Görüntü veri toplama ve işleme adımından sonra Canny Filter algoritması kullanılarak kenar tespiti gerçekleştirilmiştir. Sonraki adımda elde edilen kenar eğrisi iki parçaya bölünerek sinyal eğrileri elde edilmiştir. Alçak geçiş filtresinden sinyaller geçirilerek dalgacık faktörü oluşturulmuştur. Dalgacık faktörleri arasındaki ilişkiden çıkarılan benzerliğe göre ikili eşleştirme yapılmıştır (Eslami ve diğ., 2021).



3. MALZEME VE YÖNTEM

Arkeolojik kalıntı parçalarının ve benzer parçaların (yapboz parçaları, yırtılmış kağıt parçaları, dijital olarak parçalanmış nesneler...) dijital görüntülerinden orijinal birleştirilmiş nesne görüntüsünü elde etmek için önerilen uygulamanın tasarımı, mimarisi, uygulama adımları, geliştirilen ve kullanılan algoritmalar ve yöntemler bu bölümde detaylı anlatıldı. Geliştirilen görüntü birleştirme uygulaması göre uygulama veri girişi hazırlamak için görüntü edinme, görüntü kenar bölümleme, özellik çıkarma, ikili eşleme ve çıktı verisi olarak görüntü genel bileşimi olarak Şekil 3.1'deki bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Uygulama sistemi

Uygulamada, iki boyutlu derinliği olmayan nesnelerin dijitale aktarılmış görüntüleri girdi görüntüleri olarak kullanıldı. Python programlama dili ve OpenCV bilgisayar görüntü kütüphanesi fonksiyonları kullanılarak Intel Core i7 2.30 GHz işlemci ve 16 GB RAM hafıza özellikli bilgisayar ortamında Python bütünleşik geliştirme ortamı ile önerilen görüntü birleştirme uygulama bölümleri geliştirildi ve test edildi.

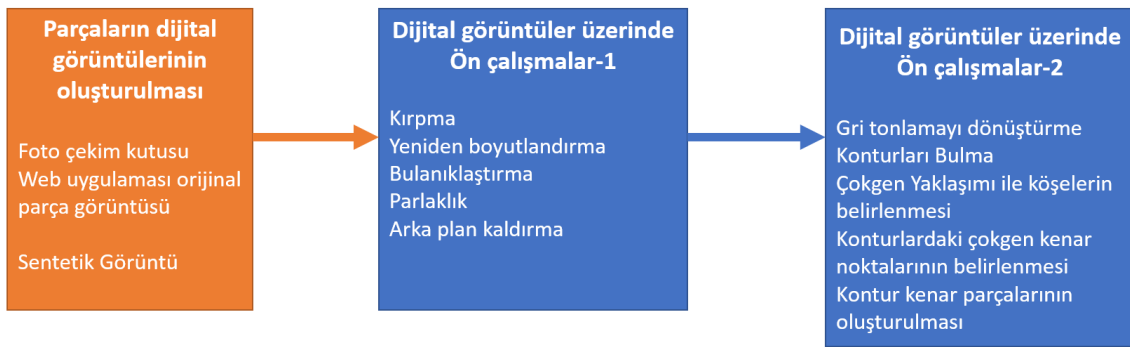
Python programlama dili dünyanın en çok kullanılan ve en popüler programlama dillerinden biridir. Güçlüdür, çok yönlüdür ve öğrenmesi kolaydır. Python çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır, bunlardan bazıları: Web Geliştirme, Veri Bilimi, Veri analizi, Makine öğrenme, Yapay Zeka, Komut dosyası oluşturma ve araçlar (URL-2).

OpenCV açık kaynaklı bir bilgisayarlı görme ve makine öğrenimi yazılım kütüphanesidir. Kütüphanede bilgisayar görüşü ve makine öğrenimi için 2500'den fazla algoritma bulunmaktadır. Bu algoritmalar, yüzleri algılamak ve tanımak, nesneleri tanımlamak,

videolardaki insan eylemlerini sınıflandırmak, kamera hareketlerini izlemek, hareketli nesneleri izlemek, nesnelerin 3 boyutlu modellerini çıkarmak, yüksek çözünürlük elde etmek için görüntüleri birleştirmek için kullanılabilir (URL-3).

3.1. Görüntü Edinme

Bu bölümde Şekil 3.2’de gösterildiği gibi nesne parçalarının görüntü edinme bölümünde dijital görüntülerinin oluşturulması ve dijitale aktarılan görüntüler üzerinde yapılan kenar bölümlleme ön çalışmalar anlatılmaktadır.



Şekil 3.2. Görüntü Edinme ve Görüntü Kenar Bölümlleme adımlarının detayları

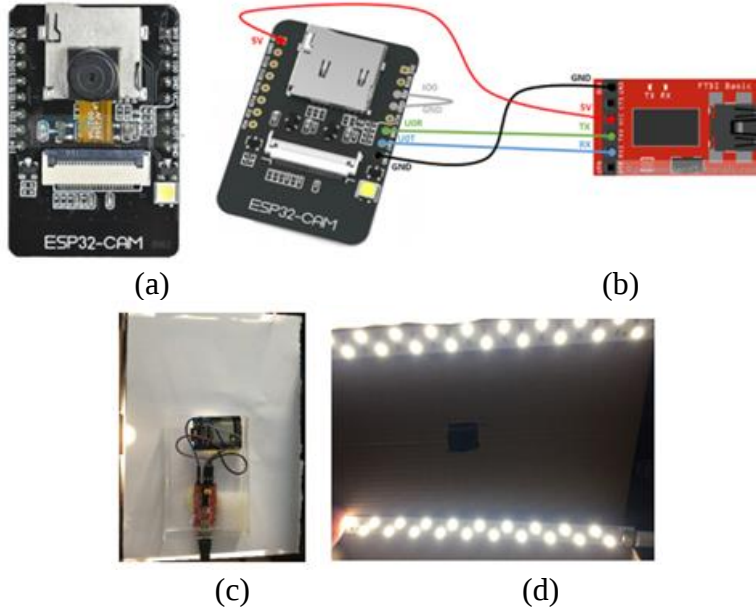
Antik kalıntılar kil, pişmiş toprak, çini, metal, ahşap, tekstil, duvar ve yer resmi parçaları ve papirüs olabilir. Örneğin kırık bir porseleni onarmak için bir arkeoloğun her bir parçanın şeklini ve sınırlarını incelemesi, orijinal görünümünü tahmin etmesi ve her bir parça çiftinin tutarlılığını test etmesi gerekir (Zheng ve diğ., 1998). Bu kalıntı tipi çeşitliliğinden dolayı her bulunan kalıntının bir kalınlığı olabilir ve tarama cihazları kullanılarak direk dijital görüntüye dönüştürülemeyebilir. El ile fotoğraf makinesi kullanılarak yapılan kalıntı görüntü çekimlerinde derinlik ve dış ortam etkileri olabilir. Bu durumlardan dolayı uygulamanın girdi görüntü verilerinin hazırlanması için bütünleşik fotoğraf çekme ortamı ile gerçek nesne parça görüntüsünün aktarımı ve dijital sentetik görüntü olarak iki görüntü edinme yöntemi kullanıldı.

Birinci yöntem olarak; iki boyutlu resimli nesne görüntülerinin dijital ortama aktarılmasında dış ortam şartlarının etkisini azaltmak, kamera konumu ve açısını sabit tutabilmek için ışıklandırılmış Şekil 3.3’te gösterilen fotoğraf çekme ortamı hazırlandı.



Şekil 3.3. Hazırlanan fotoğraf çekme ortamı

Fotoğraf çekme ortamı modülleri Şekil 3.4'te gösterilen (a) ESP32_CAM (b) FTDI Programlayıcısı (c) Kutu üstüne sabitlenmiş kamera devresi (d) Kutu içine sabitlenmiş şerit ledler yerleştirilmiş kutu ve bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır. ESP32 Bluetooth ve WI-FI özelliği olan, RF balun, güç amplifikatörü, düşük gürültülü alıcı amplifikatör, filtreler ve güç yönetimi modülleri içeren düşük maliyetli ve düşük güçlü bir mikrodenetleyici sistemdir (URL-4, 2024). FTDI Programmer modülü kullanılarak ESP32 CAM'in Arduino ile programlanarak dizüstü bilgisayar ortamındaki web uygulaması ile kablosuz ağ üzerinden haberleşmesi sağlandı. Fotoğraf çekim kutusunun direk masaüstü uygulaması ile birleştirebilmek için ESP32-CAM Board ve FTDI Programmer 'dan oluşan devre tasarlandı.



Şekil 3.4. Fotoğraf çekim kutusu bölümleri

Fotoğraf kutusuna yerleştirilen iki boyutlu resimli görüntü kağıt parçalarının; ESP32-CAM'in kamerasıyla fotoğrafları çekildi. Şekil 3.5'deki gibi bilgisayarda web tarayıcı üzerindeki uygulama ile bilgisayardaki uygulama klasörü altındaki resimler klasörü içine WI-FI internet bağlantısı vasıtasıyla aktarıldı.



Şekil 3.5. Görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılan resimli kağıt parçaları

Bilgisayara aktarılan dijital görüntüler Python programlama dilinde geliştirilen uygulama üzerinde ön işlem olarak OpenCV görüntü işleme kütüphanelerinin kırpma, yeniden boyutlandırma, bulanıklaştırma, parlaklık, arka planı kaldırma metotları uygulanarak bir sonraki adıma hazır hale getirildi. Bu işlemlerin amacı parça görüntüsünün dış kenar sınırlarının doğru ve hızlı tespit edilmesi içindir.

Fiziksel olarak yırtılan kağıt parçalarının kenarlarında kağıdın özelliğinden dolayı yırtım bölümleri yer almaktadır. Bunun yanında parçanın üzerine konulduğu zeminde farklı renk tonu dağılımlarından dolayı tek renk olmayan arka plan oluşturmaktadır. Çekilen fotoğraf görüntülerinden arka plan ve kağıt yırtım artıklarının temizlenmesi işleminde parça görüntülerinden arka planın kolay temizlenebilmesi için fotoğraf kutusu zemini beyaz renkte kağıt ile döşendi. Fotoğraf kutusundan bilgisayar ortamına aktarılan dijital görüntülere kırpma ve yeniden boyutlandırma uygulanarak geliştirilen uygulamaya giriş verisi hazırlandı.

Görüntü bulanıklaştırma ve görüntüden gürültüyü kaldırmak için görüntünün alçak geçişli filtre kernel ile evrişme işlemi sonucunda elde edilir. Kullanılan Gauss filtre kernelleri Şekil 3.6'de gösterildiği gibi genelde 3x3 ya da 5x5 boyutlarından oluşmaktadır. Bu işlem için OpenCV kütüphanesinin GaussianBlur fonksiyonu uygulandı. Gauss filtresi, yüksek frekanslı bileşenleri azaltan alçak geçişli bir filtredir.

	1	2	1
$\frac{1}{16}$	2	4	2
	1	2	1

Şekil 3.6. 3x3 Gauss kernel

Resimli kağıt parçaları orijinal görüntüden yırtılırken kağıt kenarlarında istenmeyen bazı dar beyaz alanlar yer almaktadır. Bundan dolayı parça görüntülerinin kenarları tespit edilirken hem geometrik olarak hem de renk özelliklerini etkileyecek ve sonraki adımlarda başarısızlık oranını arttıracaktır (Kamran ve diğ., 2018). Arka plan ve kağıt yırtım artıklarının temizlenmesi için OpenCV kütüphanesinin `grapCut` fonksiyonu uygulandı. GrapCut algoritması görüntüyü ön planlara ve arka planlara bölmek için kullanılır. Biri arka plan, diğeri ön plan olmak üzere iki etiket belirler. Her pikselin renk dağılımının etiketlere benzerliğine göre tüm pikselleri birbirine bağlayarak arka plan ve ön planı ayırır (Rother ve diğ., 2004). Kenar birleştirmelerinde görüntü kenar tespitinin doğru yapılması için görüntünün temizlenmesi gerekmektedir (Teddy ve diğ., 2015). Şekil 3.7’de görüldüğü üzere `grapCut` uygulamış parça görüntüsünün hem arka planı hem de kağıt yırtım artıkları temizlenmiştir. Parlaklaştırma işlemi `openCV` kütüphanesinden `convertScaleAbs` fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. `convertScaleAbs` fonksiyonu belirlenen alfa ve beta değerlerine göre görüntü piksel renklerini ölçeklendirerek görüntünün kontrastını ve parlaklığını değiştirmektedir. Alfa kontrast değeridir. Kontrast azaltmak için alfa değeri 0 ile 1 arasından kullanılmalıdır. Daha yüksek kontrast için alfa değeri 1’den büyük kullanılmalıdır. Beta parlaklık değeridir. Parlaklık değeri için iyi bir aralık $[-127, 127]$ arasından kullanılmalıdır.



Şekil 3.7. Kağıt yırtım atık bölümleri ve temizlenmiş görüntü

Tablo 3.1’de fotoğraf çekim kutusundan aktarılan orijinal görüntü üzerinde geliştirilen uygulamada yapılan ön işlemler olarak kırpma, yeniden boyutlandırma, bulanıklaştırma, arka plan kaldırma ve parlaklık adımları sonucu elde edilen görüntüler gösterilmektedir. Ön işlem uygulandıktan sonra görüntünün kenarlarındaki kağıt kalıntıları ve görüntü üzerindeki gürültüler başarılı temizlendiği tespit edildi.

Tablo 3.1. Ön işlem uygulanan görüntü ve sonuçları

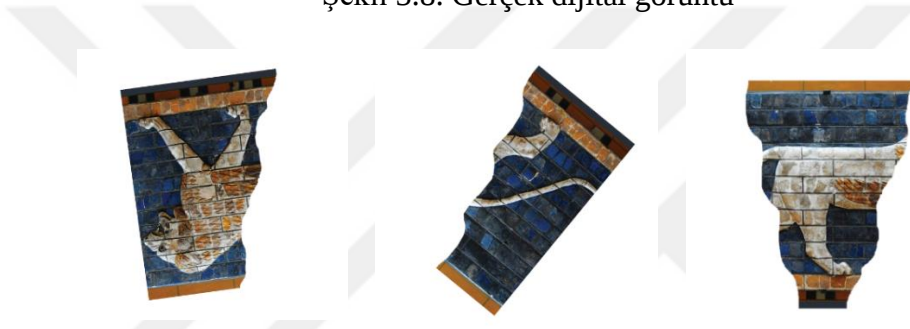
Uygulanan Metotlar	Görüntü
Orijinal görüntü Kırpma Yeniden boyutlandırma	
Bulanıklaştırma	
Arka plan kaldırma	
Parlaklık	

İkinci yöntem olarak; Şekil 3.8’deki gibi orijinal arkeolojik kalıntı görüntüsünden dijital ortamda parçalama ve döndürme işlemleri uygulanarak Şekil 3.9’de gösterildiği gibi 3

parçalı ve Şekil 3.10’da ki gibi 4 parçalı farklı eğri ve ayrılma kenarlarına sahip sentetik görüntü örnekleri elde edildi (URL-1). Oluşturulan n tane parça görüntüsü çalışma içerisinde $img_1, img_2, \dots, img_n$ olarak adlandırıldı.



Şekil 3.8. Gerçek dijital görüntü



Şekil 3.9. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 3 parçalı görüntü örnekleri



Şekil 3.10. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 4 parçalı görüntü örnekleri

Geliştirilen uygulamanın farklı renk ve kenar özellikli parça görüntüleriyle test edilebilmesi için Şekil 3.11’deki dört parçalı mozaik görüntüler ve Şekil 3.12’deki iki parçalı yapboz parça görüntüleri kullanıldı (URL-5).



Şekil 3.11. 4 parçalı mozaik görüntü örnekleri



Şekil 3.12. 2 parçalı yapboz görüntü örnekleri

Parça görüntülerinin arka planını dış ortam etkilerinden ayırmak için görüntülerin arka plan rengi uygulama ön işlem uygulanarak beyaz renk koduna değiştirildi. İkinci sentetik görüntü verisi olarak uygulamanın sonuçlarını karşılaştırmak için başka bir çalışmanın (Le ve Li, 2019) Şekil 3.13'teki sentetik görüntü veri örnekleri kullanıldı. Dokuz parçadan oluşan bu görüntü örnekleri döndürülmüş, farklı uzunlukta ve düz olmayan kenarlardan oluşmaktadır. Orijinal görüntüden programatik yöntemle parçalar oluşturulduğu için kenar eğrilerinde devamsızlık ve renk bozukluğu gerçek parça görüntülerine göre çok azdır.



Şekil 3.13. Dijital ortamda parçalanmış ve döndürülmüş 9 parçalı görüntü örnekleri

Tablo 3-2'de Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'teki parça görüntü örneklerinin parça sayısı, konum, renk ve kenar özellik ve durumları gösterilmektedir. Geliştirilen uygulamada parça sayıları ve özellikleri test kriteri olarak kullanılacaktır.

Tablo 3.2. Görüntü örneklerinin özellikleri

Görüntü	Parça Sayısı	Özellikleri
Şekil 2.8	3	Düz olmayan kenar eğrileri Döndürülmüş parça görüntüleri
Şekil 2.9	4	Düz olmayan kenar eğrileri Farklı uzunlukta kenar eğrileri Döndürülmüş parça görüntüleri
Şekil 2.10	4	Düz olmayan kenar eğrileri Farklı uzunlukta kenar eğrileri Eksik kenar eğrisi ve renk devamlılığı Döndürülmüş parça görüntüleri
Şekil 2.11	2	Düz olmayan kenar eğrileri Farklı uzunlukta kenar eğrileri Daha fazla kenar parça sayısı Döndürülmüş parça görüntüleri
Şekil 2.12	9	Düz olmayan kenar eğrileri Farklı uzunlukta kenar eğrileri Döndürülmüş parça görüntüleri

3.2. Görüntü Kenar Bölümleme

Görüntü kenar bilgisi orijinal nesnelerin şekli hakkında daha fazla sınırlama sağlayabilir. Ama görüntü üzerinde kenarları tespit etmek ve bunların doğru konumlarını doğru bir şekilde yeniden oluşturmak zordur (Tian ve diğ., 2008). Görüntü edinme bölümünde hazırlanan dijital parça görüntüleri üzerinde ilk olarak gri ölçeğe dönüştürme işlemi uygulanarak görüntü Şekil 3.14'teki gibi RGB renk modundan gri ölçeğe dönüştürüldü. Gri tonlu görüntü üzerindeki gürültüyü ve yüksek frekanslı içeriği görüntüden kaldırmak için bulanıklaştırma işlemi uygulandı. Görüntü üzerindeki nesne sınır piksellerinin belirlenmesi için önce Canny Edge Detection algoritması uygulandı. Algoritma Gaussian filter kullanarak gürültü azaltma ve kenar piksellerinin yoğunluk gradyanını ve yönünü bulma aşamalarından oluşmaktadır (Canny, 1986). OpenCV kütüphanesinin Canny fonksiyonu görüntü yanında iki tane $[0, 255]$ arasında eşik değer parametresi almaktadır. Bu değerlerin farklı görüntülerde farklılaşmaktadır. Eşik değer parametreleri minimum değer (minVal) ve maximum değer(maxVal) olarak adlandırılır. Eşik değerlerin farklı görüntüye göre belirlenmesi için cv2.threshold fonksiyonu kullanıldı. Eşikleme tipi

olarak cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU birlikte kullanıldı (Otsu, 1979). Canny fonksiyonu ile kenar algılama işleminden sonra cv2.findContours fonksiyonu ile görüntü üzerindeki bütün kontürler belirlendi. Sadece görüntünün dış kenar kontur değerlerini belirlemek için konturların oluşturduğu alanlar belirli eşik değerlerle karşılaştırılarak dış kenar kontur değerleri elde edildi.



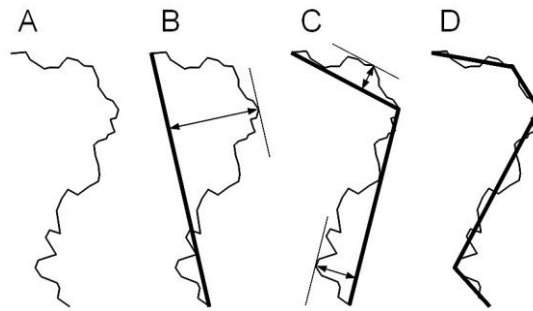
Şekil 3.14. Gri ölçeğe dönüştürülmüş görüntü

İkinci olarak görüntünün dış konturunu bulma işlemi uygulanarak görüntü dış sınır noktaları Şekil 3.15'te gösterildiği gibi mavi sınır olarak tespit edildi. Konturlar, şekil analizi ve nesne algılama ve tanıma için kullanılır. Bu işlem için OpenCV görüntü işleme kütüphanesindeki findContours fonksiyonu kullanıldı. Elde edilen kontur dizilerinin oluşturduğu en büyük kapalı döngülü alan seçilerek görüntü dış kenar konturları elde edildi.



Şekil 3.15. Görüntü üstünde mavi renkli dış kontur

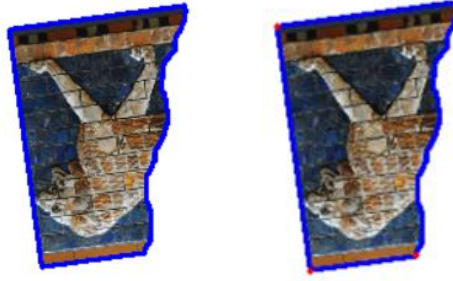
İki parça kenarı arasında mükemmel bir eşleşme mümkün değildir bundan dolayı hataya dayanlı bir kısmi eşleştirme gereklidir. Nesne görüntülerinin kısmi eğri eşleşmesi tipik olarak çok zor bir problemidir, çünkü kısmi eğrilerin belirlenmesi sınırsızdır ve eğri eşleşmesi hesaplama açısından pahalıdır (Üçoluk ve Toroslu, 1999). Görüntünün büyüklüğü eşleştirme işlem süresini etkilemektedir. İki kalıntı görüntüsünü birleştirme işlemleri için bütün kenar kontur verisini kullanmak yerine eşleştirme işlemlerini hızlandırmak için kenar kontur dizisi alt dizilerden oluşan parçalara bölündü. Üçüncü işlem olarak tespit edilen dış kontur üzerinde çokgen kenar noktaları belirleme işlemi uygulandı. Çokgen kenar noktaları belirleme işlemi için Douglas-Peucker algoritması kullanan OpenCV görüntü işleme kütüphanesindeki approxPolyDP fonksiyonu kullanıldı (Wu ve diğ., 2003). Bu bölünme işleminin her görüntüde aynı olması için cv2.approxPolyDP fonksiyonu kullanıldı. ApproxPolyDP fonksiyonu, Douglas-Peucker algoritmasını kullanarak Şekil 3.16’teki gibi bir eğriye en yaklaşık çokgeni belirler ve görüntü kenar eğrisindeki yön değişim noktalarını çokgenin köşegenleri olarak seçmektedir. Bu algoritma bir eğriye veya çokgene aralarındaki mesafenin belirtilen hassasiyet değerinin eşit veya daha az olması için daha az köşeli başka bir eğri veya çokgen ile yaklaşır. Eğrinin iki ucu arasına çizilen doğru parçasına eğri üzerindeki en büyük dik uzaklığı olan nokta belirlenir. Sonraki adımda bu noktadan diğer üç noktalar aynı işlem tekrarlanır. Eşik değerine göre bu işlem tekrarı sonlandırılır. Elde edilen noktalar çokgen köşe noktaları olarak belirlenir. (Douglas ve Peucker, 1973).



Şekil 3.16. Douglas-Peucker algoritmasının eğri üzerinde adımları

Eğrinin uzunluğu bir eşik değeri ile çarpılarak epsilon değeri elde edilir. Bu epsilon değeri kullanılarak kenar kontur üzerindeki çokgen köşe noktaları belirlenir. Geliştirilen uygulamada hassasiyet değeri olarak 0,05 kullanıldı. 0,05 değerinin çoğunlukla dört kenar alt parçası oluşturduğu gözlemlendi. Fonksiyonda hassasiyet değeri 0,05 olarak

kullanıldığında parça görüntülerinin kenarları üzerinde kırmızı olarak tespit edilen köşe noktaları Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Birinci görüntü üzerinde kırmızı çokgen kenar köşeleri

Son olarak görüntü kenarları üzerinde belirlenen çokgen kenar köşe noktalarından dış kontur eğrisi; geliştirilen parçalara ayırma algoritması ile görüntü kenar alt parçalarına Şekil 3.18’de ve 3.19’te gösterildiği gibi oluşturuldu.

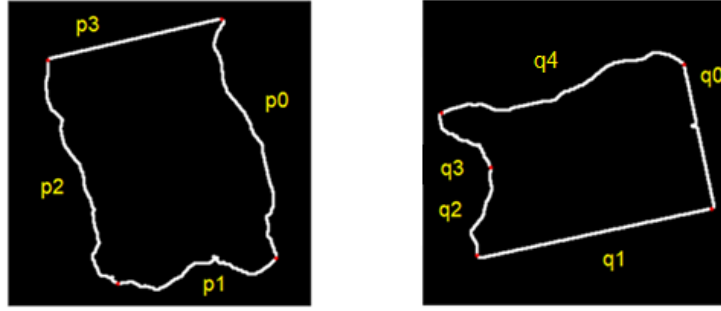


Şekil 3.18. Görüntü kenar alt parçası



Şekil 3.19. (a) Birinci görüntü alt parçası (b) İkinci görüntü alt parçası

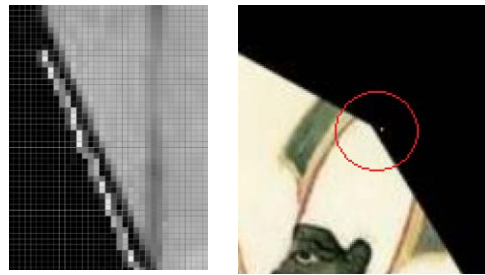
Bu işlem sonucunda Şekil 3.20’de gösterildiği gibi birinci parça görüntüsünün kenar eğrisi 4 alt parçaya bölünürken, ikinci parça görüntüsünün kenar eğrisi 5 alt parçaya bölündü. Kenar köşe noktalarına göre parçaların görüntü kenarları üzerinde tespit edilen alt parçalar; n alt parçalı birinci görüntü için Birinci_Görüntü_Alt_Parçaları = $\{ p_0, p_1, \dots, p_n \}$ ve m alt parçalı ikinci görüntü için İkinci_Görüntü_Alt_Parçaları = $\{ q_0, q_1, \dots, q_m \}$ olarak adlandırıldı.



Şekil 3.20. Görüntüler üzerinde belirlenmiş kenar alt parçaları ve adlandırmaları

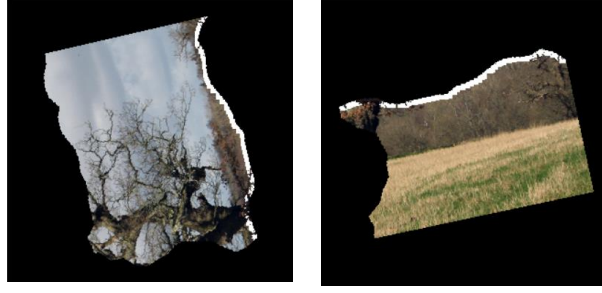
3.3. Özellik Çıkarma

Bir önceki bölümde görüntü kenar bölümlleme işlemi ile görüntülerin kenar alt parçaları verileri hazırlandı. Bu bölümde her kontur alt parçasının görüntüsü üzerindeki renk dağılım bilgisi çıkarılmaktadır. Kontur motifleri ve figürleri çevreleyen sınır çizgisi olduğu için OpenCV kütüphanesinin görüntü kenarı üzerinde çokgen köşelerini ve kontur bulma fonksiyonları kullanılarak elde edilen noktaların Şekil 3.21’de gösterildiği gibi görüntünün tam kenar sınırında değildir. Bundan dolayı sadece kontur piksel renk değerleri ile renk dağılım bilgisi çıkartıldığında sonuç içinde arka plan renk bilgisi (0, 0, 0) de yer almaktadır. Bu durumdan dolayı kenar üzerindeki belirlenen her bir kontur pikselinin etrafındaki 3x3 piksellik alandaki bütün komşu piksellerin renk değerleri kontrol edilerek sadece kontur etrafındaki arka plan olmayan piksel renk değerleri değerlendirmeye alındı.



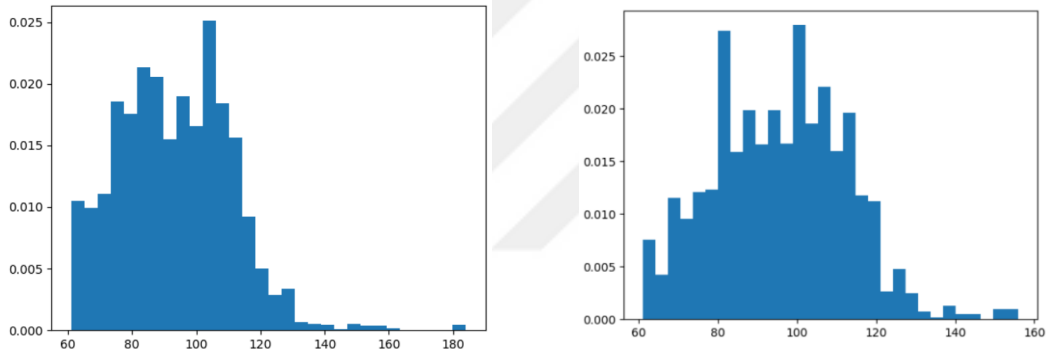
Şekil 3.21. Belirlenen kontur piksellerinin beyaz renk ile gösterimi

Şekil 3.22’de bu renk tarama algoritması sonucunda görüntü kenarı üzerinde kontrol ettiği pikseller beyaz renk kodu (255, 255, 255) ile gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Görüntü parçalarının kontur pikselleri etrafındaki taranan bölümleri

Karşılaştırılan parça görüntülerinin alt kenar çevresindeki renk dağılımının histogramları Şekil 3.23'te gösterilmektedir. İki nesne görüntüsünün kenar parça piksel renk farklılık değeri histogram dağılımları kullanılarak farklılık formülü ile hesaplanmıştır. Histogram dağılımı x ekseninde gri ölçeğe görüntü parça eğrisi etrafındaki piksellerin [0, 255] renk değerleri, y ekseninde de her değerin tekrarlama sayısını göstermektedir.



Şekil 3.23. Görüntülerin alt parçalarının piksel renklerinin histogram dağılımları

Denklem (3.1)'de gösterildiği üzere iki görüntü kenar parçalarının renk benzerliğini bulmak için önce her parçanın kontur piksellerinin renk değerleri normalize edilmiştir. Bunun sonucunda renk değerleri [0, 255]'den [0, 16]'ya dönüştürüldü. Parça görüntülerindeki renk dağılımına göre [0, 16] ve [0, 32] dönüşümleri kullanıldı.

$$\text{renk normalizasyonu} = \frac{\text{gri renk değeri}}{255} \times 16 \quad (3.1)$$

Eğer birinci ve ikinci görüntü birbirine uygunsa, ortak bir alt sınırlara sahip olmaları gerekir (Kong ve Kimia, 2001), (da Gama Leita ve Stolfi, 2002), (McBride ve Kimia, 2003), (Willis ve Cooper, 2004), (Willis ve Cooper, 2006). Eğer karşılaştırılan görüntülerin parçaları birbirinden kopan parçalar ise parça kontur piksel renk dağılımlarında aynı değerler olması gerektiği varsayılmıştır. İki görüntünün karşılıklı iki

parçasının renk benzerliği Şekil 3.24'te ki en uzun ortak dizi algoritması kullanılarak hesaplandı. Kullanılan en uzun ortak algoritmasında dinamik programlama kullanılarak m ve n uzunluğundaki renk dizilerinde $O(m*n)$ karmaşıklıkta çözüm bulundu. Renk benzerliği elde edilen $L(m,n)$ değeridir.

Girdiler:

R1: Birinci görüntü alt parçaları kontör renk dizisi;

R2: İkinci görüntü alt parçaları kontör renk dizisi;

m : Birinci görüntü alt parçaları kontör renk dizi uzunluğu

n : İkinci görüntü alt parçaları kontör renk dizi uzunluğu

Çıktılar:

Eşleşen en uzun renk dizisinin uzunluk değeri içeren $L(m,n)$ değeri

Renk benzerliği: $L(m,n)$

Prosedür:

```
for i=0 to birinci görüntü parça renk dizi uzunluğu do
  for j=0 to ikinci görüntü parça renk dizi uzunluğu do
    Eğer i=0 ve j=0 ise:
       $L(i,j) = 0$ 
    Değilse ama  $R1(i-1)$  ile  $R2(j-1)$  eşitse:
       $L(i,j) = L(i-1,j-1)+1$ 
    Değilse:
       $L(i,j) = L(i-1,j)$  ve  $L(i,j-1)$  in en büyük değeridir.
```

Şekil 3.24. İki parçanın kontur renk benzerlik hesaplama algoritması

3.4. İkili Eşleme

İkili eşleşme adımı için örnek görüntülerin önceki adımlar sonucunda belirlenmiş alt kenar parçaları Şekil 3.25'te gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Görüntülerin alt kenar parçaları

İkili eşleme bölümünde karşılıklı olarak görüntülerin alt parçaları eşleştirilerek en iyi eşleşme değerleri hesaplandı. Birinci örnek görüntü alt kenar parça eğrileri $p = \{p_0, p_1, p_2,$

p_3 } ve ikinci örnek görüntü alt kenar parça eğrileri $q = \{ q_0, q_1, q_2, q_3 \}$ olmak üzere uygulama üzerinde oluşan ikili eşleşme kümesi kümelerin kartezyen çarpımı olan $pxq = \{ (p_0, q_0), (p_0, q_1), (p_0, q_2), (p_0, q_3), (p_1, q_0), (p_1, q_1), (p_1, q_2), (p_1, q_3), (p_2, q_0), (p_2, q_1), (p_2, q_2), (p_2, q_3), (p_3, q_0), (p_3, q_1), (p_3, q_2), (p_3, q_3) \}$ şeklindedir.

3.4.1. Geometrik Yöntem

Birinci görüntüden elde edilen M kenar parçası ile ikinci görüntüden elde edilen N kenar parçası birbirleriyle MN işlem ile sırayla eğrilik özelliğine göre karşılaştırıldı. Birbiriyle eşleşen parçaların eşleşme kenarlarında benzer eğri ve renk dağılımına sahip olduğu varsayıldı. Bundan dolayı iki parçanın alt kenar eğrileri döndürüldüğünde birbirleriyle eşleşme durumlarının oluşması beklendi. Bu işlem için karşılaştırma işleminin 360 kere tekrarlaması gerekirdi. Bu zaman kaybını hızlandırmak için önce birinci ve ikinci kenar parça görüntülerinin orta noktaları belirlendi. Bu işlemden sonra birinci parça görüntüsü sabit tutularak ikinci parça görüntüsünün orta noktası birinci parça noktasının orta noktasına kaydırıldı.

İkili eşleşme işleminde önce Şekil 3.26'deki gibi karşılaştırılan kenar parçaların uç noktaları olan $A(x_2, y_2)$ ve $B(x_1, y_1)$ arasında bir doğru parçası çizilerek eğim değerleri $m_1, m_2, \dots$ olarak Denklem (3.2) kullanılarak hesaplandı.

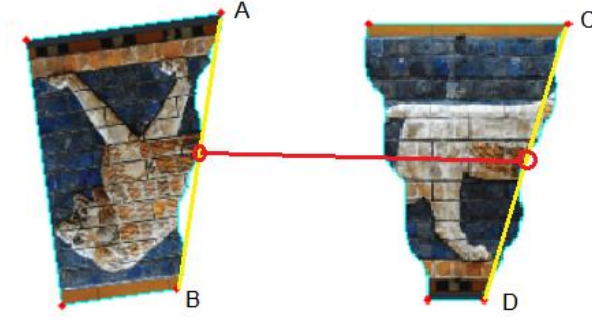


Şekil 3.26. Görüntü kenar doğru parçası

$$m_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.2)$$

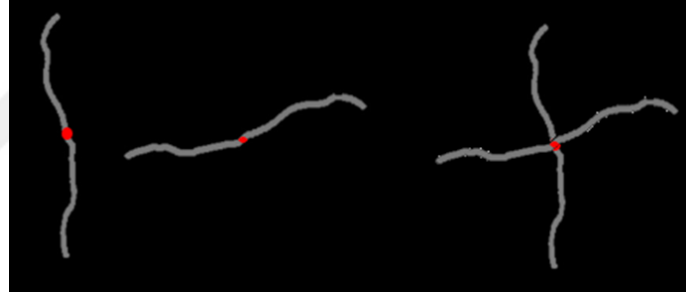
İki görüntü parçaları üzerindeki doğru parçaları için m_1 ve m_2 eğim değerleri hesaplandıktan sonra iki doğru parçasının Şekil 3.27'deki gibi orta noktaları Denklem (3.3) ile hesaplanarak belirlendi.

$$O(x, y) = \left(\frac{x_2 + x_1}{2}, \frac{y_2 + y_1}{2} \right) \quad (3.3)$$



Şekil 3.27. Parça uç noktaları arasında çizilen doğru parçası

Şekil 3.28'deki gibi iki alt kenar doğru parçaları belirlenen orta noktalarından birbirlerinin üzerine konumlarının farkına göre Şekil 3.29'deki algoritma kullanılarak kaydırıldı.



Şekil 3.28. Parçaların orta noktası üzerinde kaydırılmış görüntüsü

Girdiler:

Görüntü alt parçaları kontör listeleri;

Çıktılar:

X ve Y koordinatları için kaydırma değerleri

Birinci görüntü parçası orta noktasına kaydırılmış ikinci görüntü parçası

Prosedür:

Birinci görüntü(soladaki) parça kontör listesi uzunluğunun yarısındaki elemanın değeri(lcx,lcy)

İkinci görüntü(sağdaki) parça kontör listesi uzunluğunun yarısındaki elemanın değeri(rcx,rcy)

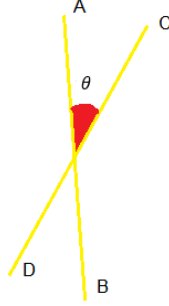
Kaydırma miktarı(dx,dy) = rcx - lcx, rcy - lcy

for i=0 to ikinci görüntü parça uzunluğu do

Her bir kontör koordinatını (dx, dy) farkı kadar kaydır.

Şekil 3.29. Parçaları orta noktalarına göre kaydırma algoritması

Şekil 3.30'deki gibi orta noktalarından üst üste getirilen doğru parçalarının arasındaki açı Denklem (3.4)'deki gibi doğru parçalarının eğim değerleri kullanılarak hesaplandı.



Şekil 3.30. Kenar doğru parçaları arasındaki açı

İki doğru parçası arasındaki açı değeri Denklem (3.4)'de elde edilen sonucun ters tanjant değeridir (Machisi, 2014).

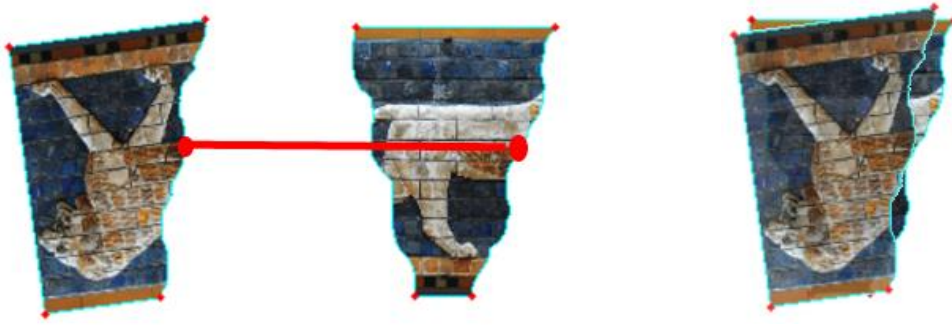
$$\tan \theta = \left| \frac{m_2 - m_1}{1 + m_1 m_2} \right| \quad (3.4)$$

Elde edilen açı değerine göre ikinci görüntü parçası birinci görüntü parçası orta noktaları üzerinde Şekil 3.31'da ki gibi döndürüldü.



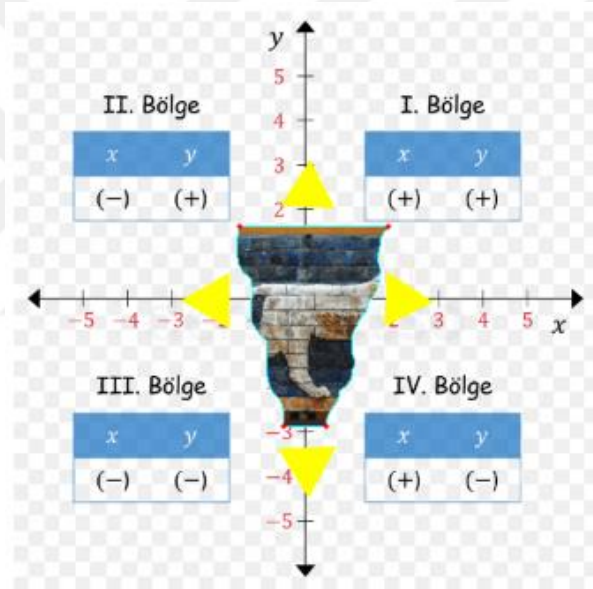
Şekil 3.31. Hesaplanan açı kadar döndürülmüş kenar parçaları

Döndürme işlemi saat yönünde gerçekleşir. Şekil 3.32'deki gibi eğer karşılaştırılan kenar parçaları aynı yönde ya da ters konumdaysa döndürülme işlemi sonucunda görüntülerin üst üste gelme durumu oluşmaktadır. Bu durum ile karşılaşma olasılığını azaltmak için hesaplanan açının tümleyenleri, bütünleyenleri ve ters açıları olarak $-90 + \theta$, $-1 * \theta$, θ , $180 - \theta$, $-180 + \theta$, $180 + \theta$, $90 + \theta$, $-180 - \theta$ gibi hesaplanıp bu açılara göre karşılaştırılması gerekmektedir. Bu durum işlem sayısını 8 kat arttıracaktır.



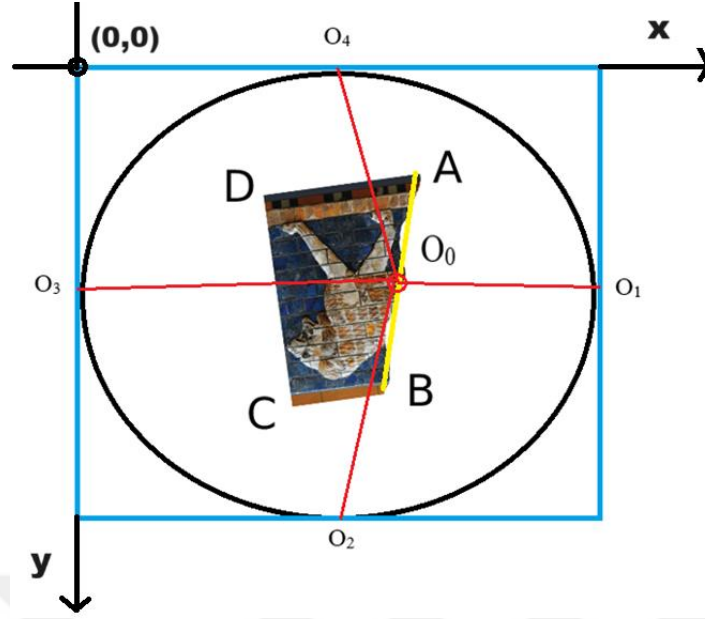
Şekil 3.32. Aynı yönde olan kenar parçaların üst üste gelmesi durumu

Algoritmanın karmaşıklığını azaltabilmek için farklı bir yaklaşımla Şekil 3.33'te gösterildiği gibi parça görüntüsünün dış çerçevesi referans koordinat sistemi olarak alındı. Kare dış çerçeve dört bölgeye ayrılarak varsayılan yön işaretleri belirlendi.



Şekil 3.33. Görüntü kenar parçalarının yönleri

Şekil 3.34'te görüntü kenar alt parçası olan AB doğru parçasının orta noktası O_0 ile görüntü arka planın orta noktaları O_1 , O_2 , O_3 ve O_4 göre uzaklık doğru parçaları kırmızı renkte gösterilmektedir. Denklem (3.5) kullanılarak görüntünün bütün kenar alt parçalarının başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki doğru parçasının orta noktalarının kare şeklindeki görüntü arka planın kenarlarının orta noktaları O_1 , O_2 , O_3 ve O_4 'e olan uzaklığı hesaplandı.



Şekil 3.34. Görüntü kenar alt parça orta noktalarının dış kenarlara uzaklığı

$$\text{iki nokta arasındaki uzaklık} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.5)$$

Şekil 3.35'teki algoritma kullanılarak görüntü kenarlarının yönleri ve dönme açı kümeleri hesaplandı. Algoritma görüntülerin kare arka planının kenar orta noktalarını referans noktaları olarak kullanarak kenarın orta noktasına en yakın olan referans noktasına göre varsayılan yön belirlenmiştir.

Girdiler:

Görüntülerin kenarlarının O_0, O_1, O_2, O_3 ve O_4 noktalarının koordinatları
 fixedL = Kare şeklindeki görüntü arka planının bir kenarının uzunluğu

$$O_1 = (\text{fixedL}, \text{round}(\text{fixedL} / 2))$$

$$O_4 = (\text{round}(\text{fixedL} / 2), 0)$$

$$O_3 = (0, \text{round}(\text{fixedL} / 2))$$

$$O_2 = (\text{round}(\text{fixedL} / 2), \text{fixedL})$$

Çıktılar:

Görüntülerin kenarlarının yön ve dönme açısı kümesi

Prosedür:

$$d_1 = \text{sağ}(1)$$

$$d_2 = \text{yukarı}(2)$$

$$d_3 = \text{sol}(3)$$

$$d_4 = \text{aşağı}(4)$$

Şekil 3.35. Kenar yön ve dönme açısı kümesi belirleme algoritması

Girdiler:

Görüntülerin kenarlarının O_0, O_1, O_2, O_3 ve O_4 noktalarının koordinatları
 $fixedL$ = Kare şeklindeki görüntü arka planın bir kenarının uzunluğu

$$O_1 = (fixedL, round(fixedL / 2))$$

$$O_4 = (round(fixedL / 2), 0)$$

$$O_3 = (0, round(fixedL / 2))$$

$$O_2 = (round(fixedL / 2), fixedL)$$

Çıktılar:

Görüntülerin kenarlarının yön ve dönme açısı kümesi

Prosedür:

$$d_1 = sağ(1)$$

$$d_2 = yukarı(2)$$

$$d_3 = sol(3)$$

$$d_4 = aşağı(4)$$

Denklem (2.5) kullanılarak;

$$l_1 = O_0 \text{ ve } O_1 \text{ arasındaki uzaklık}$$

$$l_2 = O_0 \text{ ve } O_2 \text{ arasındaki uzaklık}$$

$$l_3 = O_0 \text{ ve } O_3 \text{ arasındaki uzaklık}$$

$$l_4 = O_0 \text{ ve } O_4 \text{ arasındaki uzaklık}$$

$$\min = l_1$$

$$\text{yön} = 1$$

Eğer $\min, l_3$ den büyükse:

$$\min = l_3$$

$$\text{yön} = 2$$

Eğer $\min, l_5$ den büyükse:

$$\min = l_5$$

$$\text{yön} = 3$$

Eğer $\min, l_7$ den büyükse:

$$\min = l_7$$

$$\text{yön} = 4$$

Eğer birinci kenarın yön değeri ile ikinci kenarın yön değeri aynıysa:

$$\text{yön kümesi} = \{-1 \cdot \text{angle}, 180 - \text{angle}, 180 + \text{angle}\}$$

Eğer birinci kenarın yön değeri ile ikinci kenarın yön değeri arasındaki fark 2 ise:

$$\text{yön kümesi} = \{\text{angle}, 180 - \text{angle}, -1 \cdot \text{angle}\}$$

Eğer birinci kenarın yönü sağ ve ikinci kenarın yönü yukarı ise:

$$\text{yön kümesi} = \{\text{angle} - 180\}$$

Şekil 3.35. (Devam) Kenar yön ve dönme açısı kümesi belirleme algoritması

Eğer birinci kenarın yönü yukarı ve ikinci kenarın yönü sağ ise:
yön kümesi = $\{-1 * \text{angle}\}$

Eğer birinci kenarın yönü sol ve ikinci kenarın yönü yukarı ise:
yön kümesi = $\{180 - \text{angle}\}$

Eğer birinci kenarın yönü yukarı ve ikinci kenarın yönü sol ise:
yön kümesi = $\{\text{angle} - 180\}$

Eğer birinci kenarın yönü sağ ve ikinci kenarın yönü aşağı ise:
yön kümesi = $\{180 - \text{angle}\}$

Eğer birinci kenarın yönü aşağı ve ikinci kenarın yönü sağ ise:
yön kümesi = $\{\text{angle} - 180\}$

Eğer birinci kenarın yönü sol ve ikinci kenarın yönü aşağı ise:
yön kümesi = $\{-180 + \text{angle}\}$

Eğer birinci kenarın yönü aşağı ve ikinci kenarın yönü sol ise:
yön kümesi = $\{\text{angle}\}$

Diğer durumlarda:

yön kümesi = $\{-90 + \text{angle}, -1 * \text{angle}, \text{angle}, 180 - \text{angle}, -180 + \text{angle}, 180 + \text{angle}, 90 + \text{angle}, -180 - \text{angle}\}$

Şekil 3.35. (Devam) Kenar yön ve dönme açısı kümesi belirleme algoritması

Sonraki adımda karşılaştırılan görüntü parçalarının uzunlukları hesaplanmıştır. Birinci alt parça uzunluğu l_1 ve ikinci alt parça uzunluğu l_2 olarak; $l_1 > l_2$, $l_1 < l_2$ ve $l_1 = l_2$ durumları oluşabilmektedir. Birinci ve ikinci durumlarda kısa olan parçanın uzun olan parçanın iki uç noktası taraflarından A başlangıç noktasından B bitiş noktasına doğru ya da B bitiş noktasından A başlangıç noktasına doğru durumların birinde eşleştiği varsayılmıştır. Uzun olan parçanın kısa olan parça uzunluğu kadar bölümü alınıp bu iki alt parçalar karşılaştırıldı. İkinci yaklaşım olarak kısa olan kenar uzun olan kenar üzerinde adım adım hareket ettirilerek eşleşen bölge seçimi yapıldı. Eğer parça uzunlukları eşitse direk eşleşme aşamasına geçildi. Eğer iki görüntünün kenar parçaları birbirinden koptuysa, kenar piksel etrafındaki komşular benzer olmalı ve eşleşen diğer noktalara göre geometrik tutarlılık sağlanmalıdır (Sánchez-Belenguer ve Vendrell-Vidal, 2014). Parça eğrilerinin döndürme ve öteleme işlemi sonrası üst üste getirildiğinde en iyi eşleşmenin olacağı beklenmektedir (Shewale ve diğ., 2014).

İki görüntünün kenar eğrilerinin benzerlik değerinin hesaplanmasında iki türlü yöntem kullanıldı. Birinci yöntemde Tablo 3.3'te gösterildiği gibi birinci görüntünün karşılaştırılan alt kenar eğrisi 127 renk kodu ile ve ikinci görüntünün karşılaştırılan alt kenar eğrisi de 128 renk kodu ile oluşturuldu.

Tablo 3.3. Birinci ve ikinci parça görüntülerinin karşılaştırılan alt kenar eğrileri

Renk kodu	Birinci ve ikinci parça görüntülerinin alt kenarları	Birinci ve ikinci parça görüntülerinin karşılaştırılan alt kenarları	Birinci ve ikinci parça görüntülerinin karşılaştırılan alt kenar eğrileri (Birinci alt kenar eğrisi ikinciye göre döndürülmüştür.)
127			
128			

Tablo 3.4'te gösterildiği gibi belirlenen açıya göre birinci alt parça görüntüsü döndürüldükten sonra ikinci görüntü ile aynı orta merkeze ötelenerek toplandı. Bu eğriler doğru eşleştiği zaman kesişen bölümlerde üst üste gelen piksellerin renk kodu 255 oldu. Bu durumda bileşen görüntü üzerinde piksel renkleri siyah olarak 0, birinci görüntü kenar eğrisi eşleşmeyen kısımlar olarak 127, ikinci görüntü kenar eğrisi eşleşmeyen kısımlar olarak 128 ve iki eğri eşleşen kısımlar olarak 255 değerleri elde edildi. Renk koduna göre eğri eşleşme oranı Denklem (3.6) ve eğri benzerlik değeri Denklem (3.7) kullanılarak hesaplandı.

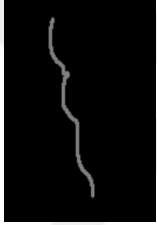
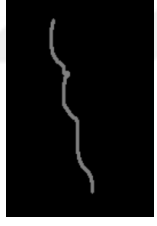
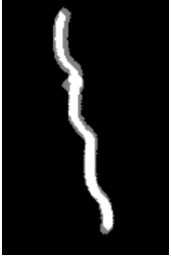
x = Bileşen görüntü üzerindeki 255 renk kodu sayısı
y = Bileşen görüntü üzerindeki 128 renk kodu sayısı
z = Bileşen görüntü üzerindeki 127 renk kodu sayısı
y₀ = Bileşme öncesi 128 renk kodu sayısı
z₀ = Bileşme öncesi 127 renk kodu sayısı

$$\text{Eşleşme oranı} = \frac{x}{\min(y_0, z_0)} \quad (3.6)$$

$$Re \text{ (Renk kodu yoğunluğuna göre eğri benzerlik değeri)} = \frac{(y+z)}{x+1} \quad (3.7)$$

Birinci ve ikinci parçaların karşılaştırılan alt kenarların eşleşme durumu kontur kalınlığı parametresine göre elde edilen eşleşme oranı başarımları Tablo 3.4'te gösterilmektedir. En iyi eşleşme durumunda maksimum eşleşme değerinin bileşme öncesi alt parça eğrilerinin en küçük renk kodu sayısı olması beklenmektedir. Bu formülasyona göre kontur kalınlığının artırılması eşleşme oranını arttırdığı gözlemlenmektedir.

Tablo 3.4. Birinci ve ikinci parçaların karşılaştırılan alt kenarların eşleşme durumu

Kontur kalınlığı	Birinci ve ikinci parçaların karşılaştırılan alt kenarları	Eşleşme durumu	y ₀	z ₀	y	z	x	Eşleşme oranı
1			847	557	434	149	408	73%
								
4			1524	1190	492	164	1026	86%
								

İkinci yöntem olarak; Denklem (3.8)'de gösterildiği üzere iki görüntü kenar parça eğrilerinin benzerliğini bulmak için MSE kullanıldı. Birinci görüntünün kenar parça eğrisinin her noktasının (x, y) koordinatı ile ikinci görüntünün parça eğrisinin her noktasının (x, y) koordinatı arasındaki farklar hesaplanarak eğri benzerlik değeri hesaplandı.

$$Farka göre benzerlik değeri = \sum_{i=0}^{Uzunluk} \sqrt{(x1_i - x2_i)^2 + (y1_i - y2_i)^2} \quad (3.8)$$

Renk benzerlik değeri, eğri benzerlik değeri ve parçaların küçük olanın uzunluğu kullanılarak en iyi eşleşme değeri Denklem (3.9) 'deki gibi hesaplandı.

Er = Farka göre eğri benzerlik değeri
Re = Renk koduna göre eğri benzerlik değeri
L = Renk benzerlik değeri
Ed = En iyi eşleşme değeri

$$Ed = \frac{(Er+Re)}{(L+1)} \quad (3.9)$$

Literatüre göre sadece parçaların kırılma eğrilerinin eşleştirilmesine dayanan geometrik yaklaşımlar, eğer parçaların kenarlarında bozulma varsa başarılı olamayacağı belirtilmiş ve bu durumlar için dokusal özelliklere dayalı tahmin yöntemi önerilmiştir (Sagiroglu ve Ercil, 2006). Bundan dolayı kenar bozulma durumuna göre en iyi eşleşme değeri kenar bozulması varsa ve kenar bozulması yoksa durumlarına göre Denklem (3.10)'deki gibi hesaplandı.

$$Ed = \begin{cases} \frac{(Er+Re)}{(L+1)} & \text{Eğer kenar bozulması yoksa kontur kalınlığı} = 1 \\ \frac{Re}{(L+1)} & \text{Eğer kenar bozulması varsa kontur kalınlığı} \geq 2 \end{cases} \quad (3.10)$$

En iyi eşleşme değeri en küçük olan görüntü parçaları doğru eşleşme olarak kabul edildi. İki parça görüntüsünün kenarlarının eşleştirilmesi sonucunda oluşturulan liste elemanları Denklem (3.11)'de gösterilmektedir.

θ : Sabit ikinci görüntüye göre diğer görüntünün döndürülme açısıdır.
dx: Eşleşen kenarların orta noktaları arasındaki uzaklığın x koordinatındaki değeridir.
dy: Eşleşen kenarların orta noktaları arasındaki uzaklığın y koordinatındaki değeridir.
Ed: En iyi eşleşme değeri
img1: Birinci parçanın RGB renk formatındaki görüntüsü

img2: İkinci parçanın RGB renk formatındaki görüntüsü
p1: Birinci parça görüntüsünün birinci numaralı kenar parçası
q1: İkinci parça görüntüsünün ikinci numaralı kenar parçası

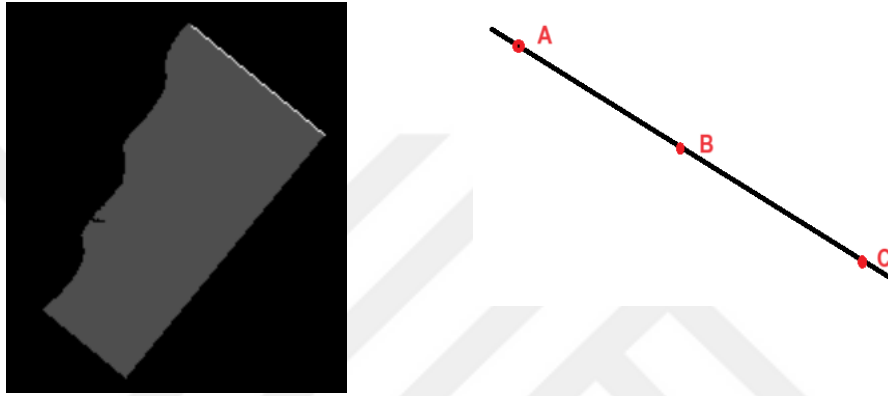
$$((\theta, dx, dy), Ed, img1, img2, p1, q1) \quad (3.11)$$

En iyi eşleşme değeri, döndürme açısı ve öteleme değerleri eklenerek bütün parçaların eşleştirmeleri için en iyi eşleşme listeleri oluşturuldu. En iyi eşleştirme listeleri en iyi eşleşme değerine göre küçükten büyüğe sıralandı. 3 parçalı görüntünün bu algoritma sonucunda Tablo 3.5’te görüldüğü gibi 0 numaralı parça ile 2 numaralı parçaların eşleşme sonucu ve 0 numaralı parça ile 1 numaralı parçaların sonuçlarının yanlış tespit edildiği görüldü. Görüntülerin düz kenar eğrilerinin en iyi eşleşme değeri en küçük değeri oluşturarak yanlış eşleşmeleri seçtiği gözlemlendi.

Tablo 3.5. Parçalı görüntülerin yanlış eşleşme sonucu

Birinci görüntü	İkinci görüntü	Birinci görüntü alt parça numarası	İkinci görüntü alt parça numarası	En iyi eşleşme değeri	Oluşan görüntü
0	2	0	1	1.4191	
1	2	3	0	1.6722	
0	1	0	2	2.2153	

Bu durumun algoritmada düzeltilmesi için kenar eğrilerinin düzlük değeri hesaplanarak belirlenen eşik değeri ile karşılaştırıldı. Şekil 3.36’teki gibi AC doğru parçasının orta noktası A ve C noktalarının koordinatları kullanılarak B noktası olarak hesaplandı. İkinci adımda BA ve BC doğru parçalarının arasındaki açı Denklem (3.4) kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan açı değerinin düze doğru parçaları için sıfıra yakın olacaktır. Bundan dolayı belirli bir eşik değeri ile hesaplanan açı değeri karşılaştırıldı. Eşik değeri altında kalanlar işlem kümesi dışında bırakıldı.



Şekil 3.36. Görüntü kenarının düz doğru parçası

Bu işlem sonucunda Tablo 3.6’de gösterildiği gibi bütün doğru eşleşme sonuçları içeren çıktılar oluştu. Oluşan görüntüler en iyi eşleşme değerine göre küçükten büyüğe sıralandığında üç parça için ilk iki sonuç doğru eşleşmeyi göstermektedir. Düz doğru parçası eğimine göre belirlenen eşik değeri değiştirilerek bütün düz kenarlar işlem dışında bırakılabilmektedir.

Tablo 3.6. Parçalı görüntülerin doğru eşleşme sonucu

Birinci görüntü	İkinci görüntü	Birinci görüntü parça numarası	İkinci görüntü parça numarası	En iyi eşleşme değeri	Oluşan görüntü
1	2	3	0	1.6722	

Tablo 3.6. (Devam) Parçalı görüntülerin doğru eşleşme sonucu

Birinci görüntü	İkinci görüntü	Birinci görüntü parça numarası	İkinci görüntü parça numarası	En iyi eşleşme değeri	Oluşan görüntü
0	2	3	2	2.2110	
0	1	0	2	2.2153	

3.4.2. DELF ve RANSAC ile Geliştirilmiş Yöntem

İki boyutlu parça görüntülerinin kenar kısımlarını eşleştirmek için Derin Yerel Özellik (DELF) ve Rastgele Örnek Konsensus (RANSAC) algoritması kullanıldı. DELF tam evrişimli ağ aracılığıyla yoğun özellik çıkararak görüntü üzerinde dikkat puanı ile ilgili özellik seçimi yapar (Noh ve diğ., 2017). RANSAC algoritması seçilen model parametrelerini kestirim amacı ile kullanılır. İki görüntü arasındaki eşleşen özellikler RANSAC algoritması ile geometrik olarak kontrol edilir. Geometrik olarak en çok uyumlu özelliklere sahip görüntülerin aynı yer işaretini gösterdiği kabul edilir (Fisher ve Bolles, 1981).

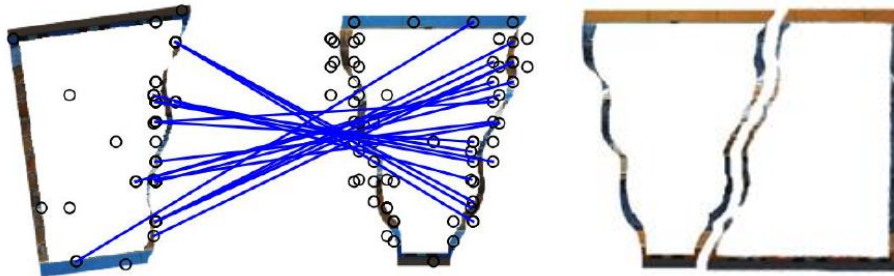
Bir görüntünün genellikle maske olarak adlandırılan bir alt kümesini elde etmek için gri renk tonlamadaki görüntü üzerinde bitwise_and işlemi uygulanır. Bitwise_and işlemi orijinal görüntünün 1 ve maskenin 1 olduğu her pikselde 1 değerini döndürür; aksi takdirde 0 değerini döndürür. Parça görüntüleri öncelikle yeniden boyutlandırıldı ve küçültüldü. Küçültülmüş görüntüler maske olarak kullanılarak orijinal görüntülerle bitwise_and işlemi uygulandı ve görüntülerin içerik ve deseni yerine sadece iki görüntüyü

eşleştirirken kullandığımız kenar piksellerini içeren görüntü parçaları Tablo 3.7’deki gibi elde edildi.

Tablo 3.7. Maske uygulanmış görüntüler

Orijinal parça görüntüsü	Kenar kısımları çıkartılmış görüntü
	
	

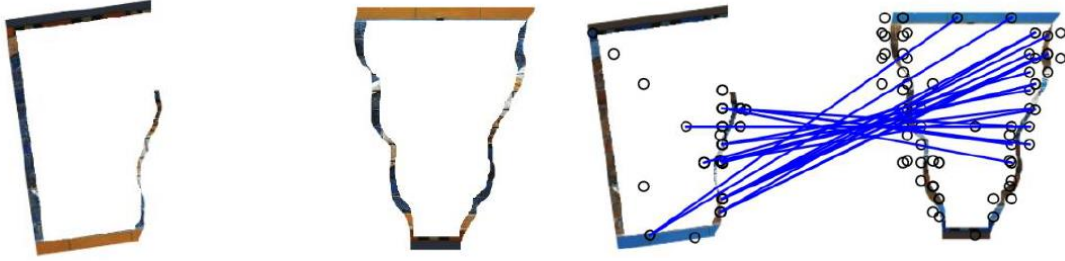
Karşılaştırılan görüntü parçalarının birbirinden ayrılması durumunda parça kenar piksel renk dağılımlarının aynı değerlere sahip olması gerektiği varsayılmaktadır. Şekil 3.37’de DELF ve RANSAC algoritmaları uygulandıktan sonra görüntü kenarları üzerinde eşleşen noktalar eşleşme çizgileri ile gösterilmektedir.



Şekil 3.37. İki görüntü arasında eşleşen noktalar

Bozulmuş ve devamlılığı olmayan kenarları simüle etmek için, Şekil 3.38’de gösterildiği gibi belirlenen görüntü kenar alanının bir kısmı silinerek, farklı kenar uzunluklarında

eşleşen alt bölümlere sahip görüntüler elde edildi. Bu görüntüler geliştirilen uygulamada girdi olarak kullanıldığında, doğru eşleştirme noktaları başarıyla tespit edilmiştir.



Şekil 3.38. Eksik kenarlı görüntülerde eşleşen noktalar

DELTA ve RANSAC yöntem ve algoritmaları kullanılarak eşleşme tahmini başarılı sonuçlar vermesine rağmen işlem zamanı açısından daha çok uzun sürmektedir. Önceki bölümlerde önerilen uygulamanın başarılı olamadığı parça bütünlüğü ciddi şekilde kaybedilmiş kalıntı görüntülerinin eşleştirilmesinde ve karşılaştırılmasında alternatif yöntem olarak kullanılabilir (Wu ve diğ., 2014).

3.4.3. Yapay Zeka Algoritması ile Geliştirilmiş Yöntem

Görüntü kenar eğim ve görüntü kenar yön kontrolleri kaldırıldığında en iyi eşleşme listesine aday olan yanlış eşleşen görüntü sayısı artmaktadır. Bunu engellemek için yapay zeka sinir ağları algoritmalarından evrimsel sinir ağları kullanılarak parça eşleştirme sonuçlarını doğru ve yanlış olarak ayıran bir sınıflandırma modeli geliştirildi. Geometrik yöntemlerle yapılan yanlış eşleştirme ayrıştırma işlemleri bu ek onay mekanizmasıyla doğrulanmaktadır.

Evrimsel sinir ağları derin öğrenmenin bir alt dalıdır ve genellikle görüntü bilgisinin analizi ile görüntü tanıma için kullanılır. Evrimsel sinir ağları giriş katmanı, evrimsel katmanlar, aktivasyon fonksiyonları, havuzlama katmanları, tamamen bağlantılı katmanlar ve çıktı katmanından oluşmaktadır.

Giriş Katmanı: Bu katman, bir görüntünün piksel değerlerini alır ve sinir ağının başlangıç noktasıdır.

Evrimsel Katmanlar (Conv): Bu katmanlar, giriş görüntüsüne filtreler uygulayarak özellik çıkarımı gerçekleştirir. Her filtre, kenarlar, köşeler veya dokular gibi belirli

desenleri veya özellikleri algılamayı öğrenir. Evrişimli katmanlar, filtrenin giriş görüntüsü üzerinde kayarak öge bazında çarpımlar ve toplamalar gerçekleştirerek özellik haritaları oluşturduğu evrişim işlemini kullanır.

Aktivasyon Fonksiyonları: Aktivasyon fonksiyonları ağa doğrusal olmayan durumlar katarak ağın karmaşık ilişkileri öğrenmesini sağlar. CNN'lerde kullanılan yaygın aktivasyon fonksiyonları arasında Düzeltilmiş Doğrusal Birim (ReLU), sigmoid ve hiperbolik tanjant bulunur. ReLU giriş pozitifse doğrudan çıkış veren, aksi halde sıfır çıkış veren parçalı doğrusal bir fonksiyondur. Birçok sinir ağı türü için varsayılan aktivasyon işlevi olarak kullanılır çünkü genellikle daha iyi performansa ulaşır.

Havuzlama Katmanları: Havuzlama katmanları, evrişimli katmanlar tarafından oluşturulan özellik haritalarının uzamsal boyutlarını alt örnekler. Örneğin maksimum havuzlama, her havuzlama bölgesi içindeki maksimum değeri seçerek en belirgin özellikleri korurken boyutluluğu azaltır.

Tamamen Bağlantılı Katmanlar (FC): Yoğun katmanlar olarak da bilinen bu katmanlar, her bir nöronu önceki katmandan sonraki katmana bağlayarak ağın giriş verilerinin üst düzey temsillerini öğrenmesini sağlar. Tamamen bağlı katmanları tipik olarak sınıf olasılıklarını üretmek için softmax gibi son bir aktivasyon fonksiyonu takip eder. Softmax, bir vektörü girdi olarak alan ve değerlerini boyutlarına bağlı olarak olasılıklara dönüştüren matematiksel bir fonksiyondur. Softmax uygulandığı zaman oluşan sonuçlar 1 'den büyük olmaz.

Çıktı Katmanı: Çıktı katmanı, öğrenilen verilere dayalı olarak nihai tahminleri veya sınıflandırmaları sağlar.

Tez çalışması kapsamında uygulama üzerinde Şekil 3.39'deki CNN sınıflandırma modeli geliştirildi. Model açık kaynaklı bir makine öğrenimi çerçevesi olan TensorFlow kullanılarak oluşturuldu. Modelin sınıfları “Doğru” ve “Yanlış” olarak adlandırıldı. Eğitim verisi olarak 3 farklı orijinal görüntüden elde edilen 2919 eşleşen görüntü kullanıldı. Model 130 doğru etiketlenmiş veri ve 2789 yanlış etiketlenmiş veri ile eğitildi. Resim verileri (64, 64, 3) olarak yeniden boyutlandırıldı. Epoch sayısı 10 ve batch büyüklüğü 32 olarak, aktivasyon fonksiyonu ReLU ve softmax kullanıldı.

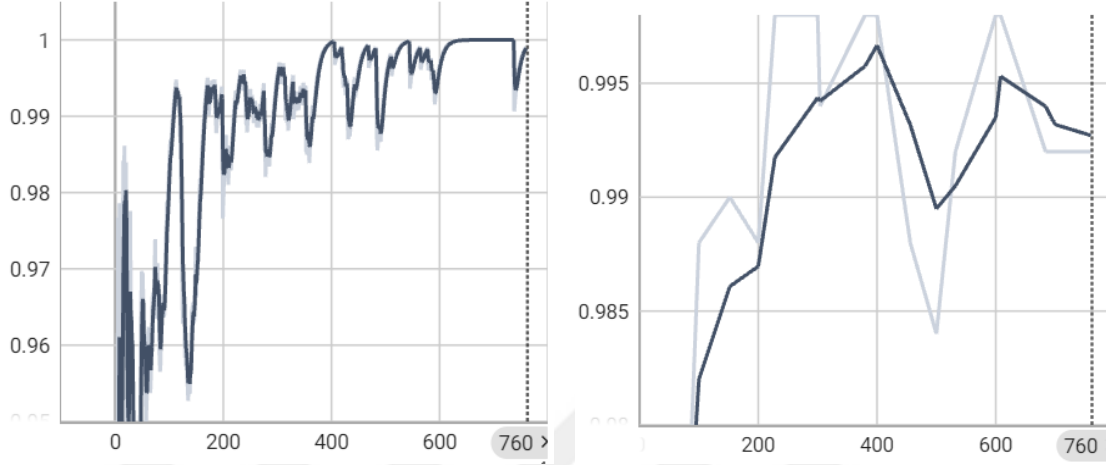
Veri Girişi

Özellik Çıkartma					Sınıflandırıcı		
Conv-1		Conv-2		Conv-3		FC-4	FC-5
Conv-1-1		Conv-2-1		Conv-3-1		Dense	
Conv-1-2		Conv-2-2		Conv-3-2		Dense	
Conv-1-3		Conv-2-3		Conv-3-3			
Conv-1-4		Conv-2-4					
Havuzlama Katmanı (Max Pooling)		Havuzlama Katmanı (Max Pooling)		Havuzlama Katmanı (Max Pooling)			

Veri Çıktısı

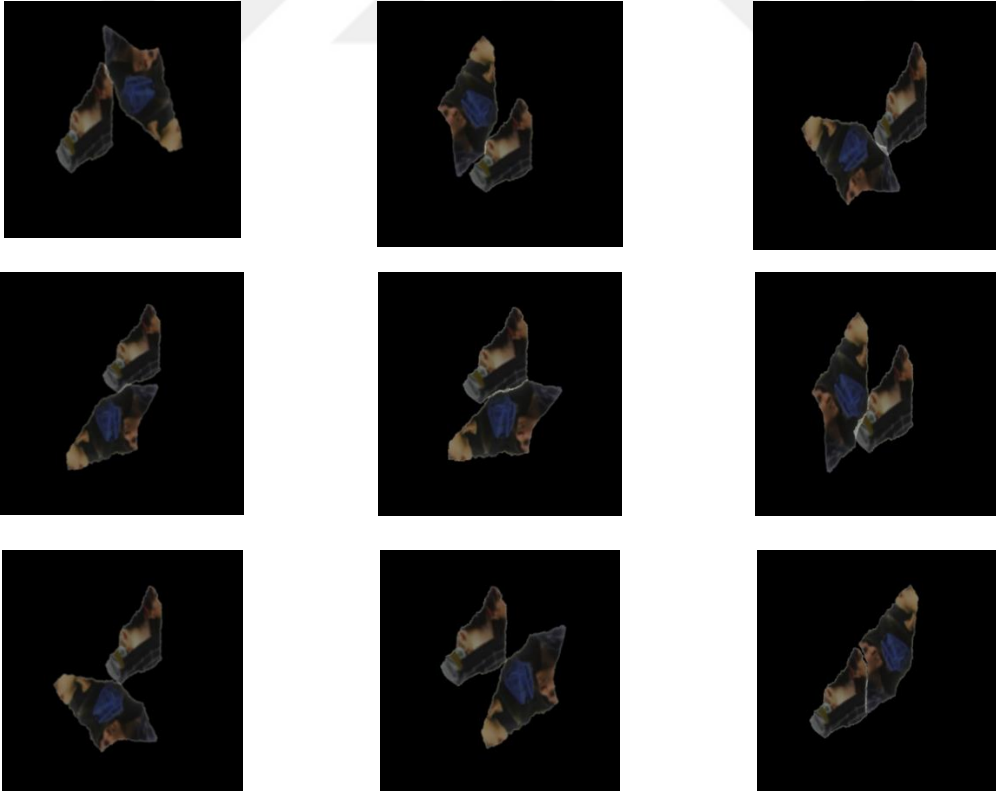
Şekil 3.39. CNN Sınıflandırma Modeli

Model sonuçlarına göre doğruluk ve doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3.40'ta gösterilmektedir. Aşırı uyum gösterme (Overfitting) azaltılması için kesilme (Dropout) değeri 50% olarak belirlendi.



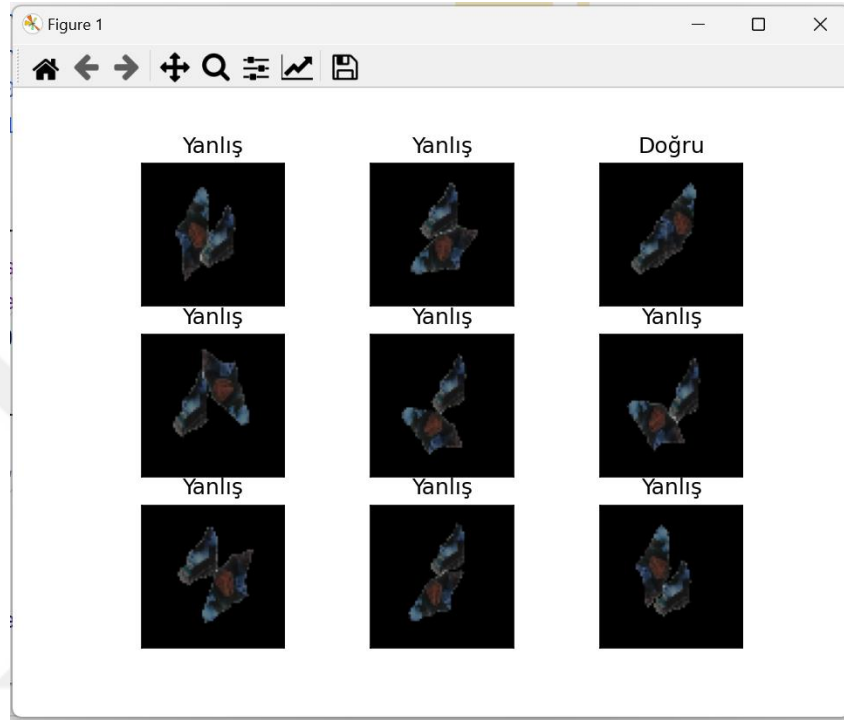
Şekil 3.40. Model doğruluk ve doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması

Geometrik yöntem ile eşleme sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 3.41'taki gibidir. Elde edilen çıktılar doğru ve yanlış parça görüntü eşlemeleri içermektedir.



Şekil 3.41. Geometrik yöntem ile eşleme sonucu elde edilen görüntü çıktıları

Şekil 3.42’da CNN modeli destekli uygulama ile elde edilen Doğru-Yanlış sınıflandırma sonuçları gösterilmektedir. Doğru eşleşen iki kağıt parça görüntüleri Doğru adlandırma ile etiketlenmiştir. Yanlış eşleşen iki kağıt parça görüntüleri Yanlış adlandırma ile etiketlenmiştir.



Şekil 3.42. CNN Modeli ile elde edilen sınıflandırma sonuçları

3.5. Görüntü Genel Bileşimi

Bütün görüntülerin parçalarının birbiriyle karşılaştırılması sonucu elde edilen en iyi eşleşme sonuçları ile görüntü genel bileşiminin elde edilmesi bölümünde aşağıdaki adımlar uygulanır:

1. Bütün en iyi eşleşme sonuçlarını içeren liste en iyi eşleşme değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanır. Şekil 3.9’deki parça görüntülerinden elde edilen eşleşme sonuçları Tablo 3.8’de gösterilmektedir. Şekil 3.9 ‘deki parça görüntüleri 0, 1, 2 ve 3 görüntü numarası olarak sıralı adlandırılır. Eşleşme sonucunda elde edilen sonuçlar en iyi eşleşme değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralandığında birinci ve ikinci görüntü sıra numarasına göre $\{(2,3), (0,3), (1,2), (0,1), (0,2), (1,3)\}$ sonuç listesi elde edildi.

Tablo 3.8. Eşleşme sonucu elde edilen sonuçlar

Birinci Görüntü Numarası	İkinci Görüntü Numarası	Birinci Görüntü Parça Numarası	İkinci Görüntü Parça Numarası	Eşleşme değerleri (Açı, dx ve dy)	En iyi eşleme değerine göre birleştirilmiş görüntüler
2	3	2	0	(-0.65, 137, 2)	
0	3	3	1	(-0.18, 1, -71)	
1	2	3	1	(0.50, 19, -56)	
0	1	3	3	(-42, 80, 42)	
0	2	3	1	(-62, 44, -32)	
1	3	3	0	(-68, 84, 4)	

2. Listenin ilk elemanı doğru eşleşme kabul edilir ve doğru eşleşme listesine eklenir. Bu eşleşmeyi oluşturan parçalar listenin diğer elemanlarında da varsa o elemanlar listeden silinir.
3. Liste bitene kadar ikinci işlem adımı tekrarlanır.
4. Elde edilen eşleşen parça numaraları Şekil 3.43'teki algoritmaya göre sıralanır. Bu algoritmanın amacı listedeki her ikilini önceki ikililerle en az bir bağlantısının olmasının sağlanmasıdır. Örnek olarak $\{(0, 1), (2, 1), (3, 4), (3, 0), (4, 5)\}$ listesi ile 5. adımda görüntüleri çizme işlemine başlarsak, uygulama önce 0 ve 1 numaralı parça görüntülerini eşleştirerek çizecek sonra 1 deki yeni lokasyon verisini kullanarak sonraki ikili olan 2 ve 1 numaralı parça görüntülerini eşleştirerek çizecek ama sonraki ikili olan (3, 4) 'e sıra geldiğinde önceki ikililer olan (0, 1) ve (2, 1) 'deki parça görüntülerinden en az biri ile aynı parça görüntüsünü içermediği için önceki çizilen görüntülerin lokasyon bilgisini alamayacak. Şekil 3.43'teki algoritma uygulandığında liste $\{(0, 1), (2, 1), (3, 0), (3, 4), (4, 5)\}$ olarak değiştirilerek bütün ikililerin önceki ikililer ile bağlantı kurması sağlanmaktadır.

Girdiler:

Üçüncü adımda oluşturulan eşleşen birinci ve ikinci görüntü sıra numaraları listesi
Eşleşen listesi = $\{(img_0, img_1), \dots\}$

Çıktılar:

Bağlantılı eşleşen ikililer (eşleşen birinci ve ikinci görüntü sıra numarası) listesi

Prosedür:

Birinci liste = 0'dan girdi ikilileri sayısına kadar ardışık artan tam sayılar 0, 1, 2, ...

Sonuç listesi = Sıfırıncı indeksli ikili ilk olarak eklenir.

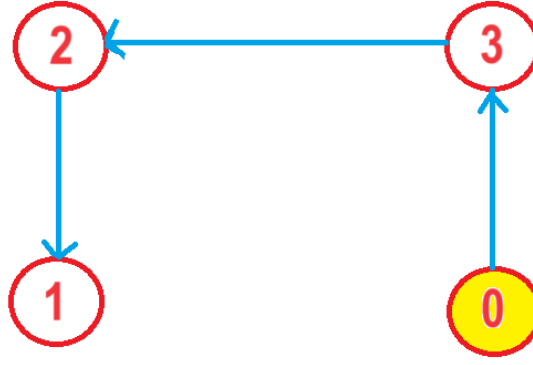
Döngü:

Eşleşen listesindeki ikililerden Sonuç listesindeki ikililerin her bir elemanı ile aynı olanların ikililerini Sonuç listesine ekle ve eklenen ikili ve elemanlarını ziyaret edilmiş olarak işaretle.

Eğer Birinci listedeki bütün elemanlar kontrol edildiyse döngüyü durdur.

Şekil 3.43. Bağlantılı eşleşen ikili sıralaması algoritması

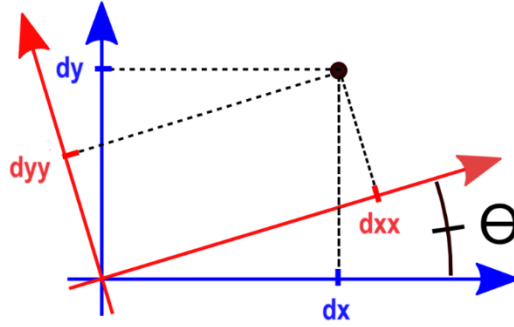
Üçüncü adım sonucunda elde edilen görüntü eşleşme listesinin algoritma uygulandıktan sonra elde edilen sonuç listesi $\{(0, 3), (2, 3), (1, 2)\}$ şeklindedir. Şekil 3.44'te gösterildiği gibi bağlantılı düğümlerden oluşturulan graf $V = \{0, 1, 2, 3\}$, $E = \{(0, 3), (2, 3), (1, 2)\}$ ve $G = (V, E)$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.44. Üç parça görüntü eşleşme listesinin yönlü graf gösterimi

Oluşturulan grafa sıfır numaralı düğümden başlayarak bütün düğümlere giden bağlantılı yollar $\{(0, 3)\}$, $\{(0, 3), (3, 2)\}$ ve $\{(0, 3), (3, 2), (2, 1)\}$ şeklindedir.

- Listenin her elemanındaki eşleşen parçaların döndürme açısı ve öteleme değerlerine göre görüntüler çizilir. Şekil 3.45'te gösterildiği gibi eşleşen görüntüler arasındaki öteleme mesafe koordinatlarının eşleşme açısına göre döndürülmesi için Denklem (3.12) ve (3.13) kullanılır.



Şekil 3.45. Öteleme koordinatlarının döndürülmesi

θ : Sabit ikinci görüntüye göre diğer görüntünün döndürülme açısıdır.

dx : Eşleşen kenarların orta noktaları arasındaki uzaklığın x koordinatındaki değeridir.

dy : Eşleşen kenarların orta noktaları arasındaki uzaklığın y koordinatındaki değeridir.

dxx : Görüntünün θ açısı kadar döndürüldükten sonra yeni dx değeridir.

dyy : Görüntünün θ açısı kadar döndürüldükten sonra yeni dy değeridir.

$$dxx = dx * \cos \theta + dy * \sin \theta \quad (3.12)$$

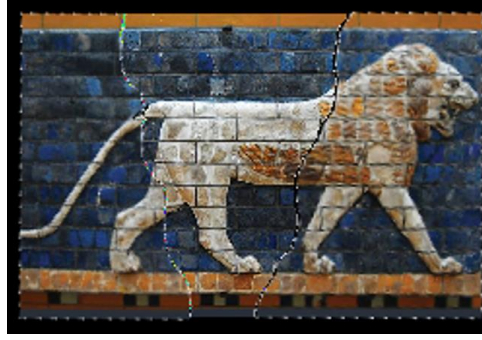
$$dyy = -1 * dx * \sin \theta + dy * \cos \theta \quad (3.13)$$

Tablo 3.9’da 0, 1, 3 ve 4 sıra numaralı parça görüntülerinin görüntü genel bileşimi algoritması sonucunda uygulamanın oluşturduğu başarılı dijital çizimler gösterilmektedir.

Tablo 3.9. Parça görüntülerinin dijital çizimi

Birleşen görüntü parçaları	Parçaların görüntülerinin dijital çizimi
0 ve 3 numaralı parça görüntülerinin birleşmesi (0, 3)	
2 numaralı parça görüntüsünün birleşmesi (2, 3)	
1 numaralı parça görüntüsünün birleşmesi (1, 2)	

Şekil 3.9’deki parça görüntülerinin görüntü genel bileşimi adımları uygulanması sonucu elde edilen görüntü Şekil 3.46’teki gibidir.



Şekil 3.46. Görüntü Genel Bileşimi sonucunda elde edilen görüntü

3.6. Görüntü Genel Bileşim Sonucunun Değerlendirilmesi

Görüntü genel bileşimi sonucunda parçalardan oluşan görüntüler arkeologlar ve restoratörler için hangi parça ile hangi parçanın hangi sırada ve hangi kenardan eşleştirilmesi gerektiği ve orijinal görüntünün neye benzediği açısından başarılı bir referans bilgisi vermektedir. Gerçek arkeolojik kalıntı bileştirme problemlerine ilişkin orijinal görüntünün bulunmaması, sonuçların değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır (Gigilashvili ve diğ., 2023). Eğer orijinal görüntü varsa; literatürde bir referans görüntü ile bozuk bir görüntü arasındaki hataların ve farklılıkların görünürlüğü sayısal olarak ölçmek için Ortalama Kare Hatası (MSE) ve Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçüsü (SSIM) değerleri kullanılmıştır.

3.6.1. Ortalama kare hatası

Ortalama Kare Hatası (MSE) hataların karelerinin ortalamasını ölçer ve karesel hata kaybının veya ikinci dereceden kaybın beklenen değerini dikkate alan riskin bir fonksiyonudur (Sara ve diğ., 2019). MSE için 0 değeri iki görüntü arasındaki mükemmel benzerliği gösterir. Sıfırdan büyük bir değer, daha az benzerlik anlamına gelir ve piksel yoğunlukları arasındaki ortalama fark arttıkça büyümeye devam edecektir. MSE değeri hesaplanabilmesi için karşılaştırılan görüntülerin boyutları aynı olmalıdır ve RGB görüntüler önce gri tonlamalı renge dönüştürülür. İki görüntünün MSE değeri Denklem (3.14) kullanılarak hesaplanır.

m, n = Görüntünün yükseklik ve genişliği
 I, K = Karşılaştırılan görüntüler

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (3.14)$$

Tablo 3.10 uygulama sonucu bileştirilen 3 parçalı, 9 parçalı ve 4 parçalı görüntülerin orijinal görüntüleri ile hesaplanan ortalama kare hatası değerini göstermektedir. Uygulama sonucu oluşan iki boyutlu dikdörtgen şeklindeki görüntüler orijinal görüntünün boyutlarına indirgemek için uzun ve kısa kenarlarından kırpılmıştır. Bu durum hesaplanan MSE değerinin artmasına sebep oldu. Görüntü parçalarının kenarlarındaki düzensizliklerden dolayı parçaların bileşiminde mükemmel birleşme olamadığından bileşme yerlerinde görüntü üzerinde farklı renkte pikseller oluşturdu. Bu durumda MSE değerinin artmasına sebep oldu.

Tablo 3.10. Ortalama Kare Hatasına göre sonuçlar

Parça sayısı	Orijinal görüntü	Uygulama sonucu bileşen görüntü	MSE değeri
3			623,5
9			2096
4			522,6

3.6.2. Yapısal benzerlik indeksi ölçüsü

Yapısal benzerlik indeksi ölçüsü (SSIM) değeri, iki farklı görüntüden alınan çerçeveler arasındaki yapısal benzerliği tespit eden bir görüntü kalite metriğidir. SSIM değeri -1 ile 1 arasında değişebilir. Değerin 1 olması mükemmel benzerliği belirtir. (Wang ve diğ.,

2004). SSIM indeks yöntemi, parlaklık, kontrast ve yapısal veya korelasyon özelliklerinin çarpımının birleşimidir. (Brooks ve diğ., 2008). İki görüntünün SSIM değeri Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanır.

μ_x ve μ_y = Yerel ortalamalar

σ_x ve σ_y = Standart sapmalar

c_1 ve c_2 = kontrast (iki görüntünün en parlak ve en karanlık bölgeleri arasındaki aralıkları farklılaştırmak için kullanılır.)

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_x\sigma_y + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3.15)$$

Tablo 3.11 uygulama sonucu bileştirilen 3 parçalı, 9 parçalı ve 4 parçalı görüntülerin orijinal görüntüleri ile hesaplanan yapısal benzerlik indeksi ölçüsü değerini göstermektedir. SSIM, MSE 'ye göre daha anlaşılır değerlerdir. Bunun nedeni MSE 'nin mutlak hata olması, ancak SSIM 'in algı ve belirginlik bazlı hataları ölçmesidir (Sara ve diğ., 2019).

Tablo 3.11. Yapısal benzerlik indeksi ölçüsüne göre sonuçlar

Parça sayısı	Orijinal görüntü	Uygulama sonucu bileşen görüntü	SSIM değeri
3			0,62
9			0,43
4			0,65

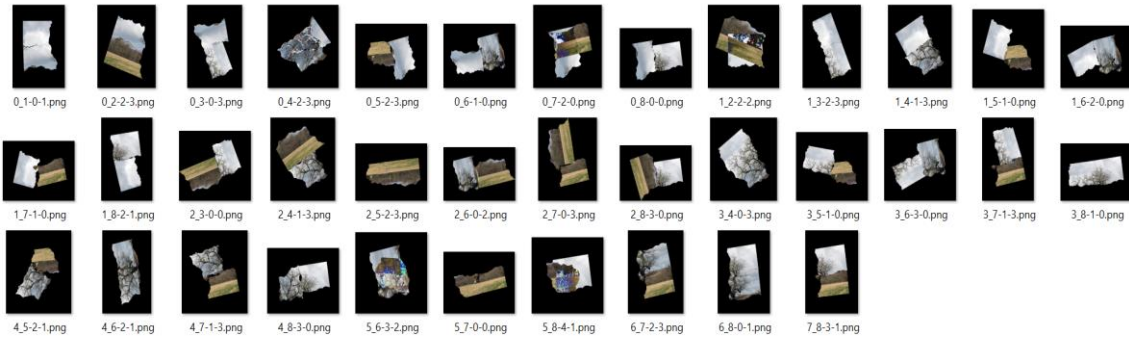
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İkinci bölümde (Le ve Li, 2019) çalışmasında kullanılan Şekil 3.10'daki dokuz sentetik görüntü üzerinde testler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dokuz görüntünün birleştirilmesi işlemi için yaptıkları çalışmada ve diğer çalışmalarla karşılaştırmalarını içeren Intel i7-4790 CPU 16 GB RAM özellikli bilgisayar ortamında elde ettikleri sonuçlar Tablo 4.1'deki gibidir.

Tablo 4.1. Farklı çalışma sonuçları

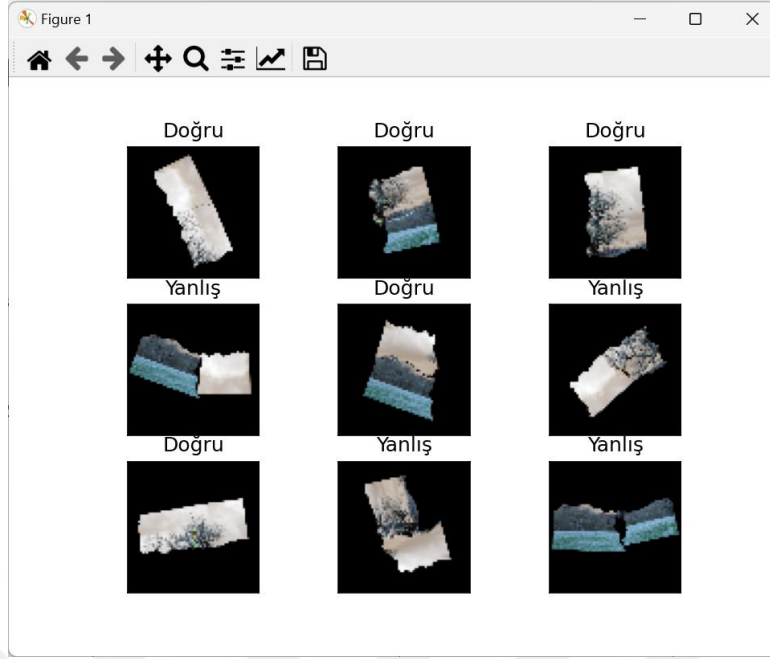
Çalışmalar (9 Görüntü)	Ortalama Zaman (Saniye)
(Tsamoura, 2010)	49,2
(Zhang, 2014)	45,6
(Le ve Li, 2019)	56,4

Geliştirilen uygulamaya Şekil 3.10'daki dokuz sentetik parça görüntüsü veri olarak girildiğinde Görüntü Genel Bileşimi bölümünde ilk olarak Şekil 4.1'de gösterilen doğru ve yanlış eşleştirmeleri içeren sonuçlar elde edildi. 9 parça görüntüsünün yükseklik ve genişlik boyutları 400 piksel olarak boyutlandırıldı. Renk nicelemesi değeri olarak 32 kullanıldı.



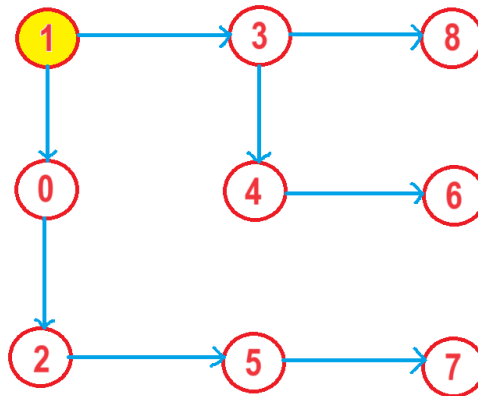
Şekil 4.1. Parça görüntülerinin eşleşme sonuçları

Elde edilen parça görüntüleri eşleşme sonuçları hazırlanan CNN sınıflandırma modeli ile Şekil 4.2'deki gösterildiği gibi doğru ve yanlış olarak sınıflandırıldı ve yanlış olarak etiketlenen eşleştirme görüntülerinin görüntü numaralarından oluşan ikilileri eşleştirme listesinden çıkarıldı.



Şekil 4.2. CNN ile parça eşleştirme sonuçlarının sınıflandırılması

Bu adımdan sonra $\{(0, 1, 0, 1), (0, 2, 2, 3), (1, 3, 2, 3), (2, 5, 2, 3), (3, 4, 0, 3), (3, 8, 1, 0), (5, 7, 0, 0), (4, 6, 2, 1)\}$ olarak görüntü eşleşme listesi oluşturuldu. Bu listedeki elemanların birinci değeri birinci görüntü numarasını, ikinci değeri ikinci görüntü numarasını, üçüncü değeri birinci görüntünün eşleşen parçasının numarasını ve dördüncü değeri ikinci görüntünün eşleşen parçasının numarasını göstermektedir. Şekil 4.3’de görüntü eşleşme listesindeki görüntü numaralarının her biri bir düğüm olarak yönlü graf olarak gösterilmiştir. Bağlantılı düğümlerden oluşturulan graf $V = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, $E = \{\{0,1\}, \{0,2\}, \{1,3\}, \{2,5\}, \{3,4\}, \{3,8\}, \{5,7\}, \{4,6\}\}$ ve $G = (V, E)$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.3. Dokuz parça görüntü eşleşme listesinin yönlü graf gösterimi

Görüntü genel bileşimi bölümünün sonucunda Tablo 4.2’deki parça görüntülerinin dijital çizimleri adım adım oluşturuldu.

Tablo 4.2. Dokuz parça görüntüsünün dijital çizimi

Birleşen görüntü parçaları	Parçaların görüntülerinin dijital çizimi
0 numaralı görüntü ile 1 numaralı görüntü bileşimi (0, 1, 0, 1)	
2 numaralı görüntünün eklenmesi (0, 2, 2, 3)	
3 numaralı görüntünün eklenmesi (1, 3, 2, 3)	
5 numaralı görüntünün eklenmesi (2, 5, 2, 3)	

Tablo 4.2. (Devam) Dokuz parça görüntüsünün dijital çizimi

Birleşen görüntü parçaları	Parçaların görüntülerinin dijital çizimi
4 numaralı görüntünün eklenmesi (3, 4, 0, 3)	
8 numaralı görüntünün eklenmesi (3, 8, 1, 0)	
7 numaralı görüntünün eklenmesi (5, 7, 0, 0)	
6 numaralı görüntünün eklenmesi (4, 6, 2, 1)	

Görüntü genel bileşimi sonucunda 9 parça görüntüsünün başarılı birleştirilmesi 37,08 saniye sürmüştür. Diğer çalışmalarda kullanılan görüntülerin eni ve boyu maksimum 350 piksel boyutlarında olmasına rağmen bu uygulamada 400 piksel olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.3'te elde geliştirilen uygulama sonucunda elde edilen sonucun diğer önceki sonuçlarla uygulama süresi açısından karşılaştırılması gösterilmektedir. Geliştirilen uygulama 9 görüntünün birleştirilmesinde en iyi sonucu elde etmiştir.

Tablo 4.3. Geliştirilen Uygulama sonucu ile diğer sonuçlar

Çalışmalar (9 Görüntü)	Ortalama Zaman (Saniye)
(Tsamoura ve Pitas, 2010)	49,2
(Zhang ve Li, 2014)	45,6
(Le ve Li, 2019)	56,4
Geliştirilen Uygulama (Geometrik Yöntem)	37,08
Geliştirilen Uygulama (Geometrik Yöntem + CNN)	43,74

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının temel amacı; arkeologlar ve restoratörler tarafından el ile yapılan arkeolojik kalıntılardan orijinal nesneyi elde edebilmek için yeniden bileştirilmesi ve oluşturulması işlemlerine zaman ve efor açısından fayda sağlayabilmek için bilgisayar ortamında kalıntı parça dijital görüntülerinin yeniden otomatik bileştirilmesi için geometrik ve yapay zeka yöntem ve algoritmalarından faydalanan bir yazılım uygulaması geliştirmektir. Önerilen uygulama, arkeologlara yardımcı olmak ve yüzeyleri kırık olan eserlerin yeniden inşasında gereksiz el ile operasyon ve keşiflerden kaçınmak için tasarlandı. Uygulama sonucunda elde edilen çıktılar arkeolog ve restoratörler için kalıntı parçalarını yeniden bileştirme sırasında hangi parçaları hangi sırada hangi kenarlardan birleştirmesi gerektiğini öneren bir kılavuz oluşturmaktır. Bu amaçla arkeolojik kalıntı görüntüler ile ilgili çalışmalar yanında literatürde yer alan iki boyutlu yapboz ve dijital parçalanmış sentetik görüntülerin bileştirilmesi ile ilgili çalışmalarda incelenmiştir. Uygulama geliştirirken kullanılan ve önerilen yöntem ve algoritmalar ile doğru parçaların genel bileşimi ve zaman parametrelerine odaklanılmıştır. Geliştirilen uygulama önceki çalışmalarda kullanılan parça görüntüleri ile de test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen uygulamada test edilen Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 parça görüntülerinin bileşim sonuçları Tablo 5.1’de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Farklı parça sayısına göre sonuç değerleri

Görüntü	Parça Sayısı	Renk Niceleme Sayısı	Düzlük Eşik Değeri	Kontur şeklinin yaklaşık değeri	Ortalama Zaman (Saniye)
Şekil 2.8	3	16	0.25	0.05	1.0348
Şekil 2.9	4	16	0.25	0.05	1.2750
Şekil 2.10	4	7	0.25	0.05	4.7942
Şekil 2.11	2	7	0.25	0.05	0.8353

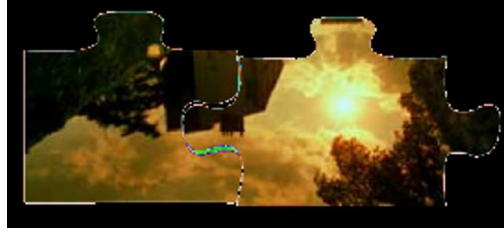
Tablo 5.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde; görüntünün parça sayısı, renk niceleme sayısı, düzlük eşik değeri, kontur şeklinin yaklaşık değeri parametrelerine göre görüntü genel bileşiminde elde edilen görüntü çıktısına kadar geçen toplam zaman parametrelerine

göre görüntü edinme yöntemlerinden fotoğraf çekme ortamı ile elde edilen kağıt parçalar geliştirilen uygulama üzerinde Şekil 5.1’de görüldüğü gibi doğru eşleştirildi. İki kağıt parçasının görüntü genel bileşiminin elde edilmesi 0.8353 saniye sürdü. Şekil 3.9 ‘deki 4 parçalı görüntülerin global bileşim süresi 1.2750 saniye sürerken Şekil 3.10 ‘deki 4 parçalı mozaik görüntülerin global bileşim süresi 4.7942 saniye sürmüştür. Bu iki görüntü örnek kümesini incelediğimizde parça görüntülerinde düz olmayan kenar eğrileri, farklı uzunlukta kenar eğrileri ve döndürülmüş parça görüntüleri ortak özellikleri varken ikinci görüntü kümesinde parça görüntülerde eksik kenar eğrisi ve eksik renk devamlılığı vardır. Görüntü kenar eğrilerinde eksik eğri bölümlerin ve bundan dolayı renk devamlılığının eksik olmasından dolayı uygulamanın doğru eşleme sonuçlarını elde etmek algoritma zaman karmaşıklığının arttığı gözlemlendi.



Şekil 5.1. İki kağıt parçasının doğru eşleşen görüntüsü

Uygulamanın Şekil 5.2’de gösterildiği gibi iki tane yapboz parça görüntülerinin genel bileşimini başarılı gerçekleştirdiği tespit edildi. Yapboz parçalarının kenar eğrilerindeki eşleme için daha fazla kenar alt parça sayısı ihtiyaç olduğu görüldü. Yapboz parçalarının kenar eğrilerinin köşe noktalarının iç açıları ve birbirini izleyen herhangi iki köşe noktası arasındaki merkezi açılar hemen hemen aynıdır, yapboz parçasının ağırlık merkezine olan mesafeleri yaklaşık olarak aynıdır (Yao ve Shao, 2003). Kenar alt parça sayısı arttırılabilmek için çokgen kenar köşe sayısı arttırıldı.



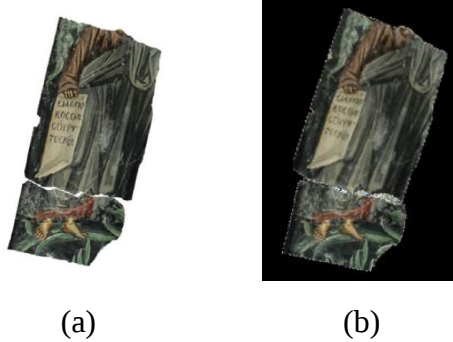
Şekil 5.2. İki tane yapboz parçasının görüntü genel bileşimi

Sentetik olarak düzgün parçalanan görüntülerin kenarlarından pikseller silinerek kenarların düzgünlüğü ve benzerliği bozuldu. Bu parça görüntülerinde uygulamada doğru eşleşmesi Şekil 5.3'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Kenarları bozulmuş görüntü eşleştirmeleri

Şekil 5.4 (a)'deki parça görüntülerine parça kenar tahminleme işlemi uygulanmıştır. Parçalar arasındaki boşlukları giderebilmek için renkleri doğrudan, geometriyi ise dolaylı olarak kullanılmıştır. Parça kenar tahminleme işlemi ile parçanın hasar görmeden ve aşınmadan önce nasıl görüldüğü tahmin ediliyor ve eşleşen bir parça kenarı ile diğer parça kenarı arasında süreklilik sorununu çözmesi amaçlanmıştır (Derech ve diğ., 2021). Şekil 5.4 (b)'de tez çalışmasında geliştirilen uygulamanın sonucu görülmektedir. Herhangi bir kenar genişletmesi yapılmadan doğru kenarları bileştirmiştir.



Şekil 5.4. Kenarları arasında boşluk olan parçaların bileşimi

Tablo 5.2’de birleştirme adımları gösterilen; parça görüntülerinde eksik kenar eğrisi ve eksik renk devamlılığı olan dört parçadan oluşan mozaik kalıntılarının parça görüntülerinin Şekil 5.5’te görüldüğü gibi uygulama başarılı eşleştirme ve genel görüntü bileşimini yaptı. Normalizasyon değeri olarak 16 ve kontur kalınlık değeri olarak 4 kullanıldı. Özellikle kenar bölümlerindeki kırıklar ve eksik mozaik parçaları eğri eşleme ve renk benzerliği çıkarımında aynı sayıdaki başka parçalara göre daha fazla zaman harcanmasına sebep olduğu tespit edildi.

Tablo 5.2. Dört parça görüntüsünün dijital çizimi

Birleşen görüntü parçaları	Parçaların görüntülerinin dijital çizimi
0 numaralı görüntü ile 1 numaralı görüntü bileşimi (0, 1, 1, 3)	
0 numaralı görüntü ile 3 numaralı görüntü bileşimi (0, 3, 2, 0)	
2 numaralı görüntü ile 3 numaralı görüntü bileşimi (2, 3, 3, 1)	



Şekil 5.5. Dört tane mozaik parçasının görüntü genel bileşimi

Tez çalışması kapsamında geliştirilen uygulamanın farklı görüntü örnekleri üzerinde görüntü parçalarının eşleştirilmesinde ve genel bileşim çiziminde doğru sonuçlar çıkardığı görülmüştür. Arkeolog ve restoratörler için parçaları el ile doğru eşleştirme, parça eşleştirme sırası ve olası orijinal nesneyi görselleştirme açısından uygulama sonucunda elde edilen veriler faydalı olabilir.

Genel görüntü bileşimi sonucunda çizilen görüntü ile orijinal görüntü arasındaki hata payını azaltmak için parça görüntülerinin ikili eşleştirmelerinde hata payının azaltılması gerekmektedir. Eşleştirme sonucunda doğru ve yanlış sınıflandırma için CNN derin öğrenme algoritması kullanımının başarılı olduğu görülmüştür. Eksik parçaların tamamlanması içinde çekişmeli üretken ağ modelleri (GAN) yapay zekâ algoritması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abitbol, R., Shimshoni, I., Ben-Dov J. (2021). Machine Learning Based Assembly of Fragments of Ancient Papyrus. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14(3), 1–21.
- Amigoni, F., Gazzani, S., Podico, S. (2003). A Method for Reassembling Fragments in Image Reconstruction. 2003 *International Conference on Image Processing*, Barselona, İspanya, 14-17 Eylül 2003.
- Brooks, A.C., Zhao, X., Pappas, T. (2008). Structural Similarity Quality Metrics in a Coding Context: Exploring the Space of Realistic Distortions. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(8), 1261-1273.
- Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(6), 679-698.
- Da Gama Leitao, H., Stolfi, J. (2002). A Multiscale Method for the Reassembly of Two-Dimensional Fragmented Objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(9), 1239–1251.
- Derech, N., Tal, A., Shimshoni, I. (2021). Solving Archaeological Puzzles. *Pattern Recognit*, 119(C), 108065.
- Douglas, D. H., Peucker, T. K. (2011). Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent A Digitized Line or Its Caricature. *The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 10(2), 112–122.
- Eslami, D., Angelo, L. D., Stefano, P. D., Guardiani, E. (2021). A Semi-Automatic Reconstruction of Archaeological Pottery Fragments from 2D Images Using Wavelet Transformation. *Heritage*, 4(1), 76–90.
- Fisher, M., Bolles, R. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Comm. of the ACM*, 24(6), 381–395.
- Gigilashvili, D., Lukesova, H., Gulbrandsen, C. F., Harijan, A., Hardeberg, J. Y. (2023). Computational Techniques for Virtual Reconstruction of Fragmented Archaeological Textiles. *Heritage Science*, 11, 259.
- Gur, S., Ben-Shahar, O. (2017). From Square Pieces to Brick Walls: The Next Challenge in Solving Jigsaw Puzzles. *ICCV*, Venice, İtalya, 22-29 Ekim 2017.
- Kamran, H., Zhang, K., Li, M., Li, X. (2018). An LCS-based 2D Fragmented Image Reassembly Algorithm. *13th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. *IEEE*, Colombo, Sri Lanka, 08-11 Ağustos 2018.

- Le, C., Li, X. (2019). JigsawNet: Shredded Image Reassembly using Convolutional Neural Network and Loop-based Composition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(8), 4000-4015.
- Machisi, E. (2014). Students' Use of Multiple Solution Strategies to Find the Angle Between Two Intersecting and Non-perpendicular Lines. *Mediterranean Journal of Social Sciences MCSER Publishing*, 5(6), 309-317.
- McBride, J. (2002). Archaeological Fragment Re-Assembly Using Curve Matching, M.S. Thesis, Brown Univ., Div. Eng., Providence, RI.
- Mara, H., Sablatnig, R. (2006). Orientation of Fragments of Rotationally Symmetrical 3D-Shapes for Archaeological Documentation. *3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Third International Symposium*, Chapel Hill, North Carolina, USA, 14-16 Haziran 2006.
- Noh, H., Araujo, A., Sim, J., Weyand, B., T. (2017). Large-scale Image Retrieval with Attentive Deep Local Features. *The IEEE International Conference on Computer Vision*, Venice, İtalya, 22-29 Ekim 2017.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.* 9(1), 62–66.
- Palmas, G., Pietroni, N., Cignoni, P., Scopigno, R. (2013). A Computer-assisted Constraint-based System for Assembling Fragmented Objects. *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Marseille, Fransa, 28 Ekim 2013-01 Kasım 2013.
- Papaodysseus, C., Arabadjis, D., Panagopoulos, M., Rousopoulos, P., Exarhos, M., Papazoglou, E. (2008). Automated Reconstruction of Fragmented Objects Using Their 3D Representation-Application to Important Archaeological Finds. *9th International Conference on Signal Processing*, Beijing, Çin, 26-29 Ekim 2008.
- Paumard, MM., Picard, David, Tabia H., (2018). Image Reassembly Combining Deep Learning and Shortest Path Problem. *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, Münih, Almanya, 8–14 Eylül 2018.
- Rasheed, NA, Nordin, MJ. (2015). A Survey of Classification and Reconstruction Methods for the 2D Archaeological Objects. *International symposium on technology management and emerging technologies (ISTMET)*, Langkawi, Malezya, 25-27 Ağustos 2015.
- Rother, C., Kolmogorov, V., Blake, A. (2004). Grabcut: Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts. *Transactions on Graphics*, 23(3), 309-314.
- Sagiroglu, M., Ercil, A. (2006). A Texture Based Matching Approach for Automated Assembly of Puzzles. *In Proc. of ICPR*, Hong Kong, Çin, 20-24 Ağustos 2006.

- Sara, U., Akter, M., Uddin MS. (2019). Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR-A comparative study. *Journal of Computer and Communications*, 07(03), 8-18.
- Sánchez-Belenguer, C., Vendrell-Vidal, E. (2014). An Efficient Technique to Recompose Archaeological Artifacts from Fragments. *International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM)*, Hong Kong, Çin, 09-12 Aralık 2014.
- Shewale, R., Pawar, S., Bhoite P., Gavali S., Mujgond, SS., Kulkarni NJ. (2014). An Approach to Reassemble Forensics and Archaeological Image Fragments into Equivalent Original Image, *Int. Res. J. of Science & Engineering*, 2(6), 203-208.
- Sizikova E., Funkhouser T. (2018), Wall Painting Reconstruction Using a Genetic Algorithm. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(1), 1-17.
- Sholomon, D., David, O. E., Netanyahu, N. S. (2014). A Generalized Genetic Algorithm-based Solver for Very Large Jigsaw Puzzles of Complex Types. *The Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 4(1), 2839-2845.
- Teddy, D., Romain, J., Aladine, C., Sylvie, T., Matthieu, E., Lionel, M., Sebastien, J. (2015). Automatic Pattern Recognition on Archaeological Ceramic by 2D and 3D Image Analysis: A Feasibility Study. *International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, Orleans, Fransa, 10-13 Kasım 2015.
- Tian Y., Gerke M., Vosselman G., Zhu, Q. (2008). Automatic Edge Matching Across an Image Sequence Based on Reliable Points. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science Beijing*, 37, 657–662.
- Tsamoura, E., Pitas, I. (2010). Automatic Color Based Reassembly of Fragmented Images and Paintings. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(3), 680–690.
- URL-1: <https://muze.gov.tr/>, (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2022).
- URL-2: <https://www.python.org/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).
- URL-3: <https://opencv.org/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).
- URL-4: <https://tr.wikipedia.org/wiki/ESP32/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).
- URL-5: <https://musterfabrik-berlin.de/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).
- Üçoluk, G, Toroslu, I. H. (1999). Automatic Reconstruction of Broken 3-D Surface Objects. *Computers & Graphics*, 23(4), 573-582.
- Willis, A.R, Cooper, D.B. (2008). Computational Reconstruction of Ancient Artifacts. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(4), 65-83.

- Wu, S.T., Marquez, M.R.G. (2003). A Non-self-intersection Douglas-Peucker Algorithm. *The 16th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI)*, Sao Carlos, Brazil, 12-15 Ekim 2003.
- Yao F.H., Shao G.F. (2003). A Shape and Image Merging Technique to Solve Jigsaw Puzzles. *Pattern Recognition Letters*, 24(12), 1819–1835.
- Yilmaz, E., Nabiyeve, V.V. (2023). Comprehensive Survey of the Solving Puzzle Problems. *Computer Science Review*, 50, 100586.
- Zhang, K., Li X. (2014). A Graph-based Optimization Algorithm for Fragmented Image Reassembly. *Graphical Models*, 76(5), 484–495.
- Zhang, K., Yu, W., Manhein, M., Waggenspack, W., Li, X. (2015). 3D Fragment Reassembly Using Integrated Template Guidance and Fracture-region Matching. *The IEEE International Conference on Computer Vision*, Santiago, Şili, 07-13 Aralık 2015.
- Zhang, M., Chen, S., Shu, Z., Xin, S., Zhao, J., Jin, G., Zhang, R., Beyerer, J. (2016). Fast Algorithm for 2D Fragment Assembly Based on Partial EMD. *The Visual Computer* 32, 1–12.
- Zheng, J.Y., Zhang, Z.L., Abe, N. (1998). Virtual Recovery of Excavated Archaeological Finds. *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Austin, TX, USA, 01-01 Temmuz 1998.
- Kong, W., Kimia, B. (2001). On Solving 2D and 3D Puzzles Using Curve Matching. *CVPR, IEEE Computer Society Conference*, Kauai, HI, USA, 08-14 Aralık 2001.
- McBride, J. C., Kimia, B. (2003). Archaeological Fragment Reconstruction Using Curve-Matching. *2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, Madison, Wisconsin, USA, 16-22 Haziran 2003.
- Wang, Z., Simoncelli, E.P., Bovik, A.C. (2004). Multiscale Structural Similarity for Image Quality Assessment. *Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 09-12 Kasım 2003.
- Willis, A., Cooper, D. (2006). Estimating A-priori Unknown 3D Axially Symmetric Surfaces from Noisy Measurements of Their Fragments. *3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Third Intl Symposium*, Chapel Hill, NC, USA, 14-16 Haziran 2006.
- Willis, A. R., Cooper, D. B. (2004). Bayesian Assembly of 3D Axially Symmetric Shapes from Fragments. *CVPR*, Washington, DC, USA, 27 Haziran 2004-02 Temmuz 2004.

Wu, P.H., Ding, J.J., Guo, J.M., Kang, P.J., Pu, C.E. (2014). Banknote Reconstruction from Fragments Using Quadratic Programming and SIFT points. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Melbourne, VIC, Australia, 01-05 June 2014.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Kaya, F., **Yıldız G.**, Kavak, A. (2012). Evaluation of Collaborative Filtering Techniques for Mobile and Web Application Based Recommendation System. *International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO2012)*, Ankara, Türkiye, 1-3 Kasım 2012.
- Yıldız, G.**, Altıntaş, L. (2011). Medical Education Program Development Application of Kocaeli University, *International Science and Technology Conference (ISTEC11)*, İstanbul, Türkiye, 7-9 Aralık 2011.
- Yıldız, G.**, Duru, N. (2022). Reassembly Of Archaeologically Fragmented 2-D Objects Using Image Processing Methods. 3. *Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 10-11 Şubat 2022.
- Yıldız, G.**, Duru, N. (2023). İki Boyutlu (2D) Arkeolojik Parçalanmış Nesnelerin Görüntü İşleme ve Geometrik Metotları Kullanarak Birleştirilmesi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 16(1), 53-59.
- Yıldız, G.**, Duru, N. (2023). Matching of Archaeologically Fragmented 2d Objects Using Image Processing and Artificial Intelligence Methods. *International Journal of Modern Research in Engineering and Technology*, 10, 55-59.
- Yıldız, G.**, Kavak, A. (2011). Mobil Telefon için J2ME ile Öğrenci Bilgi Sistemi Web Servis Uygulaması Geliştirme. *II. İleri Teknoloji Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 2011.
- Yıldız, G.**, Kaya, F., Kavak, A. (2012). A Mobile Application and Web Recommendation System for Assisting Indoor Decoration. *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA2012)*, Trabzon, Türkiye, 2-4 Temmuz 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Gürel Yıldız, ilk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli şehrinde tamamladı. 2002 yılında girdiği Işık Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. 2010 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı'ndan 2012 yılında mezun oldu. 2010 ve 2012 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2013 yılı içinde aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2012'den beri özel sektörde mühendis olarak çalışmaktadır.

