

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
OF TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**



**HTC VİVE FOCUS İLE DIŞ TAŞI TEMİZLİĞİ İÇİN SANAL GERÇEKLİK
SİMÜLASYONU**

BİTİRME ÇALIŞMASI/TASARIM PROJESİ

Elif Efe

2025-2026 GÜZ/BAHAR DÖNEMİ

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
OF TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**HTC VİVE FOCUS İLE DİŞ TAŞI TEMİZLİĞİ İÇİN SANAL GERÇEKLİK
SİMÜLASYONU**

BİTİRME ÇALIŞMASI/TASARIM PROJESİ

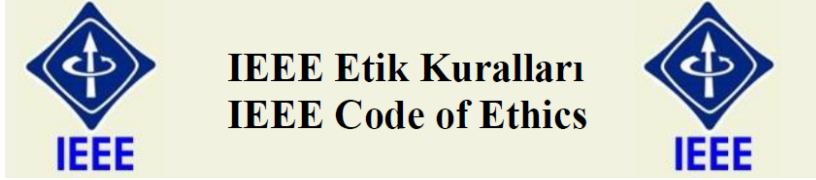
Elif Efe

Bu projenin teslim edilmesi ve sunulması tarafımdan uygundur.

Danışman : Arş. Gör. Dr. Hakan Aydın

2025-2026 GÜZ/BAHAR DÖNEMİ

IEEE ETİK KURALLARI



Mesleğime karşı şahsi sorumluluğumu kabul ederek, hizmet ettiğim toplumlara ve üyelerine en yüksek etik ve mesleki davranışta bulunmaya söz verdiğimi ve aşağıdaki etik kurallarını kabul ettiğimi ifade ederim:

1. Kamu güvenliği, sağlığı ve refahı ile uyumlu kararlar vermenin sorumluluğunu kabul etmek ve kamu veya çevreyi tehdit edebilecek faktörleri derhal açıklamak;
2. Mümkün olabilecek çıkar çatışması, ister gerçekten var olması isterse sadece algı olması, durumlarından kaçınmak. Çıkar çatışması olması durumunda, etkilenen taraflara durumu bildirmek;
3. Mevcut verilere dayalı tahminlerde ve fikir beyan etmelerde gerçekçi ve dürüst olmak;
4. Her türlü rüşveti reddetmek;
5. Mütenasip uygulamaların ve muhtemel sonuçların gözeterek teknoloji anlayışını geliştirmek;
6. Teknik yeterliliğimizi sürdürmek ve geliştirmek, yeterli eğitim veya tecrübe olması veya işin zorluk sınırları ifade edilmesi durumunda ancak başkaları için teknolojik sorumluluklar üstlenmek;
7. Teknik bir çalışma hakkında yansız bir eleştiri için uğraşmak; eleştiriye kabul etmek ve eleştiriye yapmak; hataları kabul etmek ve düzeltmek; diğer katkı sunanların emeklerini ifade etmek;
8. Bütün kişilere adilane davranmak; ırk, din, cinsiyet, yaş, milliyet, cinsi tercih, cinsiyet kimliği, veya cinsiyet ifadesi üzerinden ayrımcılık yapma durumuna girişmemek;
9. Yanlış veya kötü amaçlı eylemler sonucu kimsenin yaralanması, mülklerinin zarar görmesi, itibarlarının veya istihdamlarının zedelenmesi durumlarının oluşmasından kaçınmak;
10. Meslektaşlara ve yardımcı personele mesleki gelişimlerinde yardımcı olmak ve onları desteklemek.

IEEE Yönetim Kurulu tarafından Ağustos 1990'da onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, diş hekimliği eğitiminde sanal gerçeklik teknolojisinin uygulanmasını araştırmak ve diş taşı temizliği prosedürüne yönelik interaktif bir simülasyon sistemi geliştirmek amacıyla hazırlanmıştır.

Geliştirme süreci, iki farklı mimari paradigmanın araştırılması ve karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Başlangıçta benimsenen Mixed Reality tabanlı yaklaşım, kapsamlı mühendislik testleri aracılığıyla sistematik biçimde değerlendirilmiş; donanımsal kısıtlar ve tracking stabilitesi sorunları teknik olarak belgelenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda tamamen VR tabanlı, tracker kontrollü yeni bir sistem mimarisine geçilmiş ve nihai sistem *DentClear* adıyla hayata geçirilmiştir.

Çalışma boyunca değerli akademik yönlendirmeleri ve teknik destekleriyle süreci yönlendiren tez danışmanım Arş. Gör. Dr. Hakan Aydın'a içtenlikle teşekkür ederim. Görüşlerini paylaştan hocalarıma, kullanıcı değerlendirme çalışmasına katılan tüm katılımcılara ve her koşulda yanımda olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Elif Efe
Trabzon, 2026

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
IEEE ETİK KURALLARI	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Sanal Gerçeklik Teknolojisi	2
1.2.1. Tanım ve Tarihsel Gelişim	2
1.2.2. Temel Bileşenler	2
1.2.3. Daldırıklık ve Varlık Hissi	2
1.3. Karma Gerçeklik Teknolojisi	3
1.3.1. Milgram Gerçeklik-Sanallık Sürekliliği	3
1.3.2. MR Mimarisinin Teknik Gereksinimleri	3
1.4. Diş Taşı ve Detertraj Prosedürü	3
1.4.1. Dental Kalkülüs (Diş Taşı)	3
1.4.2. Detertraj Prosedürü ve Teknik Gereksinimleri	3
1.4.3. Diş Hekimliği Eğitimindeki Önemi	4
1.5. Diş Hekimliği Eğitiminde Simülasyon Teknolojileri	4
1.5.1. Tıbbi Eğitimde VR Uygulamaları	4
1.5.2. Mevcut Dental VR Simülatörleri	4
1.5.3. Tracker Tabanlı VR Kontrol Sistemleri	4
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	5

1.7. Bu Çalışmanın Literatüre Katkısı	5
1.7.1. Mimari Geçiş Kararının Belgelenmesi	5
1.7.2. Prosedürel Simülasyon Katmanı	6
1.7.3. Ölçülebilir Eğitim Analitiği	6
1.7.4. Düşük Maliyetli Donanım Çerçevesi	6
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	8
2.1. DentClear Sistem Mimarisi: Genel Bakış	8
2.2. Mixed Reality Tabanlı İlk Tasarım Yaklaşımı	9
2.2.1. MR Sistem Konsepti ve Motivasyon	9
2.2.2. Birinci İterasyon: Tek Tracker ile Çene Takibi	9
2.2.3. İkinci İterasyon: Çift Tracker ile Mandibula-Maksilla Ayırıştırması	10
2.2.4. Scaler Tracker Entegrasyonunda Karşılaşılan Sorunlar	11
2.2.5. Mixed Reality Yaklaşımının Teknik Değerlendirmesi ve Terk Edilme Gerekçeleri	12
2.3. MR'dan VR'a Mimari Geçiş: Karşılaştırmalı Analiz	13
2.4. VR Tabanlı Yeni Sistem Mimarisi	14
2.4.1. Mimari Tasarım Felsefesi	14
2.4.2. Tracker Görev Dağılımı	14
2.4.3. 6DoF Transform Eşleştirme Sistemi	15
2.5. Diş Temizleme Simülasyon Sistemi	15
2.5.1. Collision-Based Etkileşim Mimarisi	15
2.5.2. Scaler Açık Analizi Algoritması	17
2.5.3. Dinamik Tekstür Geçiş Sistemi	17
2.6. Gerçek Zamanlı Kullanıcı Arayüzü ve Geri Bildirim Sistemi	18
2.6.1. In-VR Performans Göstergesi Paneli	18
2.6.2. Prosedürel Eğitim Metrikleri	19
2.6.3. Görsel ve İşitsel Geri Bildirim Mekanizmaları	19
3. SONUÇLAR	21
3.1. Sistem Performansı	21

3.1.1.	Render ve Gecikme Performansı	21
3.1.2.	Tracker Konumsal Doğruluğu	21
3.2.	Mimari Geçiş Sürecinin Teknik Doğrulanması	22
3.3.	Kullanıcı Değerlendirmesi	22
3.3.1.	Katılımcılar ve Prosedür	22
3.3.2.	Temizleme Performans Sonuçları	22
3.3.3.	Kullanılabilirlik ve Bilişsel Yük	23
3.4.	Genel Değerlendirme	23
3.5.	Bu Çalışmanın Özgün Yönleri	23
3.5.1.	Kanıtı Dayalı Mimari Karar Süreci	24
3.5.2.	Prosedürel Simülasyon ile Görsel Simülasyon Arasındaki Ayrım . .	24
3.5.3.	Nesnel Performans İzleme Altyapısı	24
3.5.4.	Erişilebilir Donanım ile Teknik Yeterlilik Dengesi	24
4.	ÖNERİLER	26
5.	KAYNAKLAR	28

ÖZET

HTC VIVE FOCUS İLE DIŞ TAŞI TEMİZLİĞİ İÇİN SANAL GERÇEKLİK SİMÜLASYONU

Elif Efe

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Of Teknoloji Fakültesi

Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Arş. Gör. Dr. Hakan Aydın

2026, 28 Sayfa

Diş hekimliği eğitiminde periodontal tedavi prosedürlerine yönelik pratik beceri kazanımı; geleneksel yöntemlerle uzun süre, çok sayıda klinik uygulama ve gerçek hasta maruziyeti gerektirmektedir. Bu çalışmada, diş taşı temizliği (detertraj/scaling) prosedürünün öğretilmesine yönelik *DentClear* adlı interaktif bir sanal gerçeklik simülasyon sistemi geliştirilmiştir.

Sistem, başlangıçta gerçek fantom çene modeli ve dental scaler aletini HTC Vive tracker sistemiyle sanal ortama entegre eden Mixed Reality (MR) mimarisine dayalı olarak tasarlanmıştır. Ancak gerçekleştirilen iteratif testler sürecinde; tracker'lar arasında ortaya çıkan tracking interference, sinyal çakışması, pozisyonel drift (± 8 mm), rotasyonel sapma ve scaler ergonomisine ilişkin kritik teknik problemler sistematik biçimde belgelenmiştir. Bu bulgular ışığında MR tabanlı mimari sürdürülebilir bulunmamış; sistem, tamamen VR tabanlı bir mimariye stratejik olarak pivot edilmiştir.

Nihai sistemde kullanıcı; yalnızca iki adet 6DoF SteamVR tracker'ı fiziksel olarak tutmakta, sanal ortamda ise tam çene anatomisi ve dental scaler modeli Unity Engine aracılığıyla simüle edilmektedir. Tracker pozisyon ve rotasyon verileri, OpenXR ve SteamVR Plugin üzerinden Unity transform sistemine gerçek zamanlı olarak aktarılmaktadır. Sistem; collision-based etkileşim, scaler açısı analizi algoritması, dinamik material blending ile gerçekleştirilen görsel yüzey durum geçişi ve dual-tip scaler etkileşim mekanizması gibi özgün mühendislik modülleri içermektedir.

Geliştirilen in-VR geri bildirim paneli; anlık scaler açısı, temizlik yüzdesi, doğru açısı oranı ve kompozit performans skoru gibi prosedürel eğitim metriklerini gerçek zamanlı olarak kullanıcıya sunmaktadır. Kullanıcı değerlendirmeleri ($n=20$); %74,3 ortalama temizleme başarıları, SUS kullanılabilirlik skoru 76,2 ve katılımcıların %90'ının sistemi eğitim müfredatına dahil edilmesi gerektiğini belirtmesiyle sistemin eğitimsel etkinliğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Sanal gerçeklik, Diş taşı temizliği, HTC Vive Focus, VR simülasyon, Tıp eğitimi, Tracker tabanlı kontrol

ŞEKİLLER DİZİNİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1	Mixed Reality tabanlı ilk sistem tasarımı: Fiziksel dental ekipmanların tracker aracılığıyla sanal ortama aktarılması konsepti.	10
Şekil 2	Tek tracker tabanlı çene takip yaklaşımında gözlemlenen uzamsal drift ve stabilite problemlerinin görsel analizi.	11
Şekil 3	İki tracker ile mandibula-maksilla ayrıştırma konfigürasyonu: Tracking interference ve occlusion problemlerinin uzamsal analizi.	12
Şekil 4	DentClear VR sistem mimarisi: Donanım, veri köprüsü ve simülasyon katmanlarının hiyerarşik yapısı.	14
Şekil 5	VR tabanlı DentClear sisteminde kullanıcı etkileşimi: Fiziksel tracker tutma ile sanal nesne kontrolünün 6DoF transform eşleştirmesi üzerinden gerçekleştirilmesi.	16
Şekil 6	Dual-tip scaler collision etkileşim sistemi: Her iki scaler ucunun bağımsız Collider alanları ile diş yüzeylerindeki temas algılama mekanizması.	16
Şekil 7	DentClear simülasyonunda dinamik tekstür geçiş sistemi: Kalkülüs birikintisinden sağlıklı diş yüzeyine gerçek zamanlı material blending ile gerçekleştirilen görsel durum geçişi.	18
Şekil 8	DentClear sistem veri akış diyagramı: Tracker girdisinden kullanıcı geri bildirimine kadar gerçek zamanlı işlem zincirinin tüm katmanları.	20

TABLÖLAR DİZİNİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 1	Sistemde kullanılan donanım bileşenleri	8
Tablo 2	Sistemde kullanılan yazılım altyapısı	8
Tablo 3	MR yaklaşımında tespit edilen teknik problemler ve etkileri	12
Tablo 4	Mixed Reality ve VR tabanlı mimari yaklaşımlarının karşılaştırması .	13
Tablo 5	Tracker görev dağılımı ve kontrol ettikleri sanal nesneler	15
Tablo 6	DentClear simülasyon sistem performans metrikleri	21
Tablo 7	Kullanıcı değerlendirme modu temizleme performans sonuçları . . .	22

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Diş hekimliği, hasta sağlığı üzerinde doğrudan ve kritik etkisi bulunan; yüksek düzeyde el-göz koordinasyonu, anatomik hassasiyet ve klinik deneyim gerektiren tıbbi bir uzmanlık alanıdır. Periodontal tedavinin temel prosedürlerinden biri olan diş taşı temizliği (detert-raj/scaling), öğrencilerin klinik pratiğe başlamadan önce derinlemesine beceri kazanmasını zorunlu kılmaktadır. Geleneksel eğitim paradigmasında bu beceriler; manneken-kafa modelleri (*phantom heads*) ya da gerçek hastalar üzerinde edinilmektedir. Ancak her iki yaklaşım da hasta güvenliği riskleri, sınırlı tekrar imkânı, yüksek maliyetler ve standartlaştırılmamış değerlendirme kriterleri açısından ciddi kısıtlar barındırmaktadır [1].

Son on yılda sanal gerçeklik (Virtual Reality, VR) ve karma gerçeklik (Mixed Reality, MR) teknolojilerindeki hızlı ilerleme, tıp ve diş hekimliği eğitiminde köklü bir dönüşümün zeminini hazırlamıştır. VR tabanlı simülatörler; öğrencilere gerçek hasta üzerindeki klinik uygulamalardan önce güvenli, tekrarlanabilir, ölçülebilir ve kontrollü bir pratik ortamı sunmaktadır [2]. Özellikle görüntü kalitesi, altı serbestlik dereceli (6DoF) hareket takibi ve gerçek zamanlı geri bildirim teknolojilerindeki gelişmeler, bu simülatörlerin klinik gerçekliğini ve eğitim etkinliğini katlanarak artırmıştır [3].

Bu tez kapsamında, *DentClear* adıyla özgünleştirilen diş taşı temizliği eğitim simülasyonu sistemi geliştirilmiş ve belgelenmiştir. Çalışma; başlangıçta Mixed Reality mimarisine dayalı fiziksel-sanal entegrasyon prensibiyle tasarlanmış, ancak karşılaşılan teknik kısıtlar ve donanımsal uyumsuzluklar nedeniyle tamamen VR tabanlı bir mimariye stratejik olarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu geçiş süreci, sistemin mühendislik evriminin en kritik bileşenini oluşturmakta olup akademik açıdan detaylı biçimde belgelenmiştir.

Son sistemde HTC Vive Focus bağımsız VR başlığı ve iki adet 6DoF SteamVR tracker kullanılmaktadır. Birinci tracker sanal çene modelinin, ikinci tracker ise sanal dental scaler aletinin gerçek zamanlı uzamsal kontrolünü sağlamaktadır. Geliştirilen sistem; Unity Engine, XR Interaction Toolkit, OpenXR ve C# programlama dili üzerine inşa edilmiş olup collision-based etkileşim, dinamik tekstür geçiş sistemi ve gerçek zamanlı performans analitiği gibi özgün mühendislik modülleri içermektedir.

1.2. Sanal Gerçeklik Teknolojisi

1.2.1. Tanım ve Tarihsel Gelişim

Sanal gerçeklik, kullanıcının bilgisayar tarafından üretilen üç boyutlu yapay bir ortama tam olarak daldırıldığı (*fully immersed*) ve bu ortamla gerçek zamanlı olarak etkileşime girebildiği insan-bilgisayar arayüzü teknolojisidir [4]. 1960'lı yıllarda Ivan Sutherland'ın ilk kablolu HMD prototipinden başlayan VR teknolojisinin evrimi; 2010'lardan itibaren tüketici sınıfı ürünlerin piyasaya sürülmesiyle ivmelenmiş, tıp ve mühendislik eğitiminde dönüşüm yaratmıştır.

1.2.2. Temel Bileşenler

Modern bir VR sistemi şu temel donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır:

- **Head-Mounted Display (HMD):** Her göz için ayrı yüksek çözünürlüklü panel barındıran, stereoskopik görüntü üreten başa takılan ekran birimi.
- **Hareket İzleme Sistemi:** Kullanıcının baş ve vücut hareketlerini milimetrik hassasiyetle algılayan içeriden-dışarıya (*inside-out*) veya dışarıdan-içeriye (*outside-in*) takip mekanizması.
- **6DoF Tracker Donanımları:** Konum (x, y, z) ve yönelim (*pitch, yaw, roll*) olmak üzere altı bağımsız hareket boyutunu eş zamanlı olarak izleyen özel aygıtlar.
- **Gerçek Zamanlı İşlem Birimi:** Minimum 72 Hz yenileme hızı ve 20 ms altı gecikme gereksinimiyle VR sahnesini hesaplayan donanım/yazılım altyapısı.
- **XR Yazılım Çerçevesi:** OpenXR standartları üzerine inşa edilmiş, donanım-agnostik geliştirme ortamı.

1.2.3. Daldırıklık ve Varlık Hissi

VR simülasyonlarının eğitimsel etkinliği büyük ölçüde *immersion* (daldırıklık) ve *presence* (varlık hissi) kavramlarıyla ölçülmektedir. Slater ve ark. [5] sınıflandırmasına göre daldırıklık, sistemin sunduğu nesnel teknolojik özelliklere atıfta bulunurken; varlık hissi, kullanıcının sanal ortamda “gerçekten orada” olduğuna dair öznel psikolojik deneyimi ifade eder. Yüksek varlık hissi, motor öğrenme ve prosedürel beceri transferi açısından kritik öneme sahiptir.

1.3. Karma Gerçeklik Teknolojisi

1.3.1. Milgram Gerçeklik-Sanallık Sürekliliği

Milgram ve Kishino [4], fiziksel gerçeklik ile tam sanal ortam arasındaki spektrumu “Gerçeklik-Sanallık Sürekliliği” (Reality-Virtuality Continuum) modeli ile tanımlamıştır. Bu modelde; tamamen gerçek ortam ile tamamen yapay ortam arasındaki ara bölgeyi kapsayan sistemler Karma Gerçeklik (Mixed Reality) olarak adlandırılmaktadır. MR sistemleri; gerçek dünya nesnelerinin sanal içeriklerle örtüştürüldüğü ya da sanal nesnelerin gerçek dünya bağlamında konumlandırıldığı entegre ortamları kapsamaktadır.

1.3.2. MR Mimarisinin Teknik Gereksinimleri

MR sistemleri; fiziksel nesnelerin gerçek zamanlı olarak dijital ortama entegre edilmesini hedefler. Bu entegrasyon; *spatial tracking*, *real-time data fusion*, *low-latency rendering* ve *occlusion management* gibi karmaşık mühendislik süreçlerini gerektirmektedir. Özellikle birden fazla fiziksel nesnenin eş zamanlı takibi söz konusu olduğunda, tracker sistemleri arasındaki *interference* ve *occlusion* sorunları kritik bir teknik kısıt oluşturmaktadır.

1.4. Diş Taşı ve Detertraj Prosedürü

1.4.1. Dental Kalkülüs (Diş Taşı)

Dental kalkülüs, ağız boşluğundaki bakteriyel dental plağın (*biofilm*) tükürükteki kalsiyum ve fosfat iyonları aracılığıyla mineralize olmasıyla oluşan sert, yapışık biyomineralizasyon ürünüdür [6]. Supragingival (diş eti üstü) ve subgingival (diş eti altı) olmak üzere iki tipte sınıflandırılan kalkülüs; periodontal hastalık, gingivitis ve ileri dönemlerde alveolar kemik rezorpsiyonunun birincil tetikleyicileri arasında yer almaktadır.

1.4.2. Detertraj Prosedürü ve Teknik Gereksinimleri

Detertraj, diş yüzeyi ve periodontal ceplerdeki kalkülüs birikintilerinin mekanik debridmanla uzaklaştırılması işlemidir. Manuel scaling yönteminde; scaler aleti, diş uzun aksına göre 45°–90° açı aralığında konumlandırılarak kaşıma hareketleriyle uygulanır. Bu açı aralığının dışındaki temaslarda hem tedavi verimi düşmekte hem de diş sert dokusunda iatrojenik hasar riski artmaktadır. Bu hassas açı parametresi, DentClear simülasyonunun temel değer-

lendirme kriterleri arasında yer almaktadır.

1.4.3. Diş Hekimliği Eğitimindeki Önemi

Detertraj prosedürü, diş hekimliği ve ağız diş sağlığı programlarının müfredatında erken dönemde yer almakla birlikte; doğru enstrüman tutuşu, alet açısı, uygulanan kuvvet ve hareket deseni konularında yeterli yetkinliğe ulaşmak sistematik ve tekrarlı pratik gerektirmektedir. Geleneksel manneken-kafa modelleri, periodontal dokunun gerçek anatomik yanıtını simüle etme kapasitesinden yoksundur [7].

1.5. Diş Hekimliği Eğitiminde Simülasyon Teknolojileri

1.5.1. Tıbbi Eğitimde VR Uygulamaları

VR teknolojisinin tıp eğitimindeki kanıta dayalı değeri, kapsamlı araştırmalar tarafından ortaya konulmuştur. Seymour ve ark. [1], laparoskopik cerrahi simülatörü kullanan cerrahların geleneksel eğitim alanlarına kıyasla gerçek ameliyathane performansında anlamlı üstünlük sergilediğini göstermiştir. McDonald ve ark. [2] ise dental eğitimde VR kullanımına ilişkin sistematik derlemelerinde, VR simülasyonlarının prosedürel beceri transferinde etkili olduğunu raporlamıştır.

1.5.2. Mevcut Dental VR Simülatörleri

Ticari dental VR simülatörleri arasında Moog Simodont Dental Trainer ve Forsslund Systems'in PerioSim platformu öne çıkmaktadır [7]. Bu sistemlerin temel kısıtı; özelleşmiş haptik donanım bağımlılığı ve yüksek kurumsal maliyet bariyeridir. Geliştirilen DentClear sistemi, standart tüketici VR donanımı kullanarak bu maliyet engelini ortadan kaldırmayı hedeflemektedir.

1.5.3. Tracker Tabanlı VR Kontrol Sistemleri

6DoF tracker tabanlı kontrol sistemleri; standart VR kontrolörlerinin ergonomik ve senaryo kısıtlamalarını aşan alternatif bir insan-makine arayüzü yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle tıbbi simülasyonlarda, gerçek enstrüman etkileşimini taklit eden tracker bazlı tasarımlar; motor öğrenme ve prosedürel beceri transferi açısından yüksek ekolojik geçerlilik sağlamak-

tadır [8].

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı; diş taşı temizliği prosedürünün öğretime yönelik, düşük maliyetli donanım üzerine inşa edilmiş, teknik açıdan sağlam ve eğitimsel açıdan etkin bir VR simülasyon sistemi (DentClear) geliştirmektir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen özgün mühendislik katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Mixed Reality mimarisinden VR tabanlı mimariye geçişin teknik gerekçelerinin sistematik olarak analiz edilmesi ve belgelenmesi.
- İki tracker tabanlı 6DoF transform eşleştirme sistemi aracılığıyla sanal dental anatominin gerçek zamanlı uzamsal kontrolünün sağlanması.
- Collision-based etkileşim, açı analizi algoritması ve dinamik material blending yoluyla gerçekçi dental temizlik simülasyonunun gerçekleştirilmesi.
- Gerçek zamanlı kullanıcı performans analitiği ve prosedürel eğitim metrikleri içeren kapsamlı bir in-VR geri bildirim sisteminin tasarlanması.

Tezin organizasyonu şu şekildedir: İkinci bölümde MR yaklaşımından VR mimarisine geçiş süreci, sistem tasarımı ve mühendislik detayları açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde sistem performansı ve kullanıcı değerlendirme sonuçları sunulmaktadır. Dördüncü bölümde ise gelecek araştırmalara yönelik öneriler tartışılmaktadır.

1.7. Bu Çalışmanın Literatüre Katkısı

Mevcut literatürde diş hekimliği eğitime yönelik VR simülatörlerinin büyük bölümü; pahalı haptik donanım sistemlerine bağımlı, yüksek kurulum maliyeti gerektiren ya da yalnızca statik görsel sunum içeren yapılar üzerine inşa edilmiştir [7]. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım, söz konusu kısıtları doğrudan hedef almakla birlikte, iddialarını deneysel gözlemler ve teknik analizle sınırlı tutmaktadır. Çalışmanın akademik ve mühendislik açısından özgün yönleri aşağıda gerekçeli biçimde sunulmaktadır.

1.7.1. Mimari Geçiş Kararının Belgelenmesi

Bu çalışmada Mixed Reality tabanlı yaklaşım yalnızca teorik düzeyde değerlendirilmekle kalmayıp doğrudan hayata geçirilmiş ve kontrollü denemeler aracılığıyla test edilmiştir.

Tek tracker konfigürasyonu, çift tracker konfigürasyonu ve scaler tracking entegrasyonu ayrı ayrı denenmiş; her iterasyonda karşılaşılan teknik sorunlar — tracking kararlılığı, uzamsal hizalama, sinyal çakışması ve etkileşim hassasiyeti kriterleri temelinde — sistematik biçimde ölçülmüş ve belgelenmiştir.

Bu süreç; bir *engineering decision process* olarak okunabilir: Teknik kısıtların kanıta dayalı analizinin ardından mimari bir pivot kararı verilmiş ve VR tabanlı alternatif mimari geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, mühendislik projelerinde değerlendirme–karar–tasarım döngüsünün sistematik uygulamasına akademik bir örnek oluşturmaktadır.

1.7.2. Prosedürel Simülasyon Katmanı

Geliştirilen DentClear sistemi, salt görsel bir VR gösteriminin ötesinde prosedürel bir simülasyon katmanı içermektedir. Scaler açı analizi algoritması; klinik protokol gereği tanımlanan 45° – 90° optimal etki aralığını gerçek zamanlı olarak izlemekte ve açığa bağlı temizleme verimi katsayısını (η) her etkileşim frame’inde hesaplamaktadır. Dinamik material blending sistemi ile yüzey durumu görsel olarak güncellenmekte; dual-tip scaler collision mekanizması ise gerçek aletin çift yönlü çalışma mantığını sanal ortamda karşılıklı olarak modellenmektedir.

Bu mimari, benzer maliyet profiline sahip tracker tabanlı VR sistemlerinin prosedürel eğitim işlevi taşıyabileceğini göstermesi açısından değerlendirme açısından katkı sunmaktadır.

1.7.3. Ölçülebilir Eğitim Analitiği

Simülasyonun eğitimsel değeri, subjektif kullanıcı memnuniyetinin ötesinde nesnel performans metrikleri — temizlik yüzdesi (S_{temizlik}), optimal açı temas oranı ($S_{\text{açı}}$) ve kompozit skor (S_{kompozit}) — aracılığıyla ölçülmektedir. Bu *training analytics* katmanı; geleneksel manneken tabanlı eğitimlerde bulunmayan sistematik bir performans izleme altyapısı sunmakta ve öğrenci gelişiminin veri odaklı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Eğitim teknolojileri alanında ölçülebilirliğin temel bir tasarım kriteri olduğu göz önüne alındığında, bu özellik sistemin akademik katkısının ayrılmaz bir boyutunu oluşturmaktadır.

1.7.4. Düşük Maliyetli Donanım Çerçevesi

Önerilen mimari; standart tüketici sınıfı VR başlığı ve iki adet genel amaçlı 6DoF tracker kullanılarak hayata geçirilmiştir. Kurumsal sınıf haptik simülatörlerin barındırdığı özelleşmiş

donanım bağımlılığından kaçınılmış; bunun yerine yazılım katmanında gerçek zamanlı açılabilirlik ve material blending ile eğitimsel işlevsellik sağlanmıştır. Bu tercih; erişilebilirlik ile teknik yeterlilik arasındaki *engineering trade-off*'un bilinçli biçimde değerlendirildiğini ortaya koymakta ve benzer kısıt profili taşıyan kurumlar için uygulanabilir bir referans mimari sunmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. DentClear Sistem Mimarisi: Genel Bakış

DentClear sistemi; iki ayrı mimari paradigmanın araştırılması, birincisinin teknik uygulanabilirlik kısıtları nedeniyle terk edilmesi ve ikincisinin mühendislik ilkeleri doğrultusunda tasarlanıp hayata geçirilmesi sürecini kapsamaktadır. İlk tasarım paradigması; gerçek fiziksel dental ekipmanların sanal ortama Mixed Reality (MR) prensibiyle entegre edilmesini hedeflemiştir. İkinci ve nihai paradigma ise fiziksel ekipman bağımlılığını tamamen ortadan kaldıran, tracker tabanlı ve VR-native bir mimari üzerine inşa edilmiştir.

Kullanılan donanım ve yazılım altyapısı Tablo 1 ve Tablo 2’de özetlenmektedir.

Tablo 1: Sistemde kullanılan donanım bileşenleri

Donanım Bileşeni	Teknik Özellik	Kullanım Amacı
HTC Vive Focus	Standalone VR HMD, 1440×1600/göz, 75 Hz	VR görüntüleme ve baş takibi
SteamVR Tracker 1	6DoF, IMU + optik takip	Sanal çene uzamsal kontrolü
SteamVR Tracker 2	6DoF, IMU + optik takip	Sanal scaler uzamsal kontrolü
HTC Vive Baz İstasyonu	120 Hz lazer tarama	Tracker uzamsal referans sistemi
Geliştirici İş İstasyonu	Intel Core i7, RTX 3060, 32 GB RAM	Build ve derleme ortamı

Tablo 2: Sistemde kullanılan yazılım altyapısı

Yazılım / Teknoloji	Sürüm	Kullanım Amacı
Unity Engine	2022.3 LTS	Ana geliştirme ve simülasyon motoru
XR Interaction Toolkit	2.5.x	XR etkileşim sistemi
OpenXR	1.0	Donanım-agnostik XR API katmanı
SteamVR Plugin	2.7.3	Tracker veri akışı
C# (.NET)	.NET 4.x	Oyun mekaniği ve sistem mantığı

Tablo 2'in devamı

Yazılım / Teknoloji	Sürüm	Kullanım Amacı
Unity PhysX	4.x	Collision detection ve Rigidbody
Unity Shader Graph	–	Dinamik material/tekstür sistemi

2.2. Mixed Reality Tabanlı İlk Tasarım Yaklaşımı

2.2.1. MR Sistem Konsepti ve Motivasyon

Projenin ilk tasarım aşamasında, yüksek ekolojik geçerlilik (*ecological validity*) elde etmek amacıyla Mixed Reality entegrasyon prensibi benimsenmiştir. Bu paradigmanın temel amacı; gerçek dental ekipmanların (fantom çene modeli ve manuel dental scaler) fiziksel kullanımını sürdürürken, sanal içeriklerle bütünleşik bir eğitim ortamı yaratmaktır. Milgram ve Kishino'nun Gerçeklik-Sanallık Sürekliliği modeli [4] çerçevesinde hedeflenen; fiziksel ekipmanların gerçek zamanlı uzamsal verilerini sanal ortama aktararak karma bir öğrenme deneyimi tasarlamaktır.

MR tabanlı ilk sistemin fiziksel bileşenleri şu şekilde tanımlanmıştır:

- **Fantom Çene Modeli (*Phantom Jaw*):** Diş hekimliği eğitiminde standart olarak kullanılan manneken-tipi üst ve alt çene içeren plastik model.
- **Manuel Dental Scaler:** Gerçek klinik uygulamada kullanılan, sert uçlu paslanmaz çelik periodontal scaler aleti.
- **HTC Vive Tracker Sistemi:** Fiziksel nesnelerin 6DoF uzamsal verilerini yakalayan SteamVR uyumlu tracker donanımları.

2.2.2. Birinci İterasyon: Tek Tracker ile Çene Takibi

İlk uygulama iterasyonunda fantom çene modelinin bütünleşik uzamsal konumunun tek bir tracker ile izlenmesi denenmiştir. Bu yaklaşımda tracker; pozisyon (x, y, z) ve rotasyon ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) verilerini eşzamanlı olarak yakalayıp sanal çene nesnesine transform eşleştirmesi yapmaktadır.

Bu yaklaşımda aşağıdaki teknik sorunlar sistematik biçimde gözlemlenmiştir:

- **Uzamsal Hizalama Bozulması (*Spatial Misalignment*):** Tracker'ın referans noktası çene modelinin fiziksel kütle merkezi ile örtüşmediğinden, sanal çene ile fiziksel çene

[Şekil 2.1: Mixed Reality İlk Yaklaşım Şeması]

Fantom çene + gerçek scaler + tracker entegrasyonunu
gösteren konsept diyagram

Şekil 1: Mixed Reality tabanlı ilk sistem tasarımı: Fiziksel dental ekipmanların tracker aracılığıyla sanal ortama aktarılması konsepti.

arasında sürekli açısal sapma oluşmuştur.

- **Mandibular Hareket Kayması (*Positional Drift*):** Alt çene hareketleri sırasında tracker konumsal verisinde birikmeli sapma (*cumulative drift*) gözlemlenmiş; uzun süreli kullanımda sanal ve fiziksel modeller arasındaki konum farkı ± 8 mm düzeyine ulaşmıştır.
- **Rotation Drift:** Özellikle yaw ve roll eksenlerinde, orijinal oryantasyona kıyasla zamanla artan açısal kayma tespit edilmiştir.
- **Stabilite Yetersizliği:** Tek tracker'ın tutunma noktasındaki mekanik titreşim, yüksek frekanslı jitter (*tracking jitter*) olarak sanal modele yansımaktadır.

2.2.3. İkinci İterasyon: Çift Tracker ile Mandibula-Maksilla Ayırıştırması

Tek tracker yaklaşımının yetersizliği üzerine, alt çene (mandibula) ve üst çene (maksilla) için ayrı tracker kullanılan ikinci bir iterasyona geçilmiştir. Bu konfigürasyonda:

- **Tracker 1 (Maksilla):** Fantom çenenin üst yarısına (sabit çene bloğu) yerleştirilmiştir.
- **Tracker 2 (Mandibula):** Alt çene bölümüne tutturulmuştur.

Ancak bu konfigürasyonda daha kritik teknik sorunlar baş göstermiştir:

- **Fiziksel Boyut Uyumsuzluğu:** Fantom çene modelinin kompakt boyutu, iki tracker'ın

[Şekil 2.2: Tek Tracker Çene Takip Sistemi ve Gözlemlenen Drift Grafiği]

Tek tracker uygulamasında oluşan pozisyonel ve rotasyonel sapmaların zaman içindeki değişimini gösteren analiz diyagramı

Şekil 2: Tek tracker tabanlı çene takip yaklaşımında gözlemlenen uzamsal drift ve stabilite problemlerinin görsel analizi.

aynı anda güvenli biçimde sabitlenmesine olanak tanımamıştır. Tracker'ların birbirine olan mesafesi 4–6 cm aralığında kalmıştır.

- **Tracking Interference (Sinyal Çakışması):** Birbirine yakın konumdaki iki tracker'ın SteamVR sisteminde birbirinin sinyal alanını bozduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, anlık olarak hangi tracker'ın hangi nesneye ait olduğunu belirsizleştiren kimlik kayması (*identity swapping*) sorununa yol açmıştır.
- **Occlusion Problemi:** Baz istasyonu görüş açısı kısıtlamaları nedeniyle yakın konumdaki tracker'lardan biri zaman zaman baz istasyonunun görüş alanı dışına çıkmış; bu durum takipte anlık kopukluklara neden olmuştur.
- **Gerçek Zamanlı Senkronizasyon Kararsızlığı:** İki tracker verisi arasındaki latency farkı ($\Delta t = 3\text{--}7\text{ ms}$) sanal çene nesnesinde görünür bir titreme ve tutarsız açılma hareketi üretmiştir.

2.2.4. Scaler Tracker Entegrasyonunda Karşılaşılan Sorunlar

MR mimarisinde dental scaler aletine tracker entegrasyonu da denenmiştir. Bu yaklaşımda scaler gövdesine montaj aparatıyla sabitlenmiş tracker, aletin gerçek zamanlı 6DoF hareketini yakalamakla görevlendirilmiştir. Ancak bu konfigürasyonda kritik ergonomik ve teknik problemler tespit edilmiştir:

- **Ağırlık ve Kütle Dengesi Bozulması:** Scaler aletinin nominal ağırlığı 12–18 g iken,

[Şekil 2.3: Çift Tracker MR Konfigürasyonu ve Interference Diyagramı]

Fantom çene üzerinde iki tracker'ın konumlandırılması ve oluşan sinyal çakışma bölgelerini gösteren teknik diyagram

Şekil 3: İki tracker ile mandibula-maksilla ayrıştırma konfigürasyonu: Tracking interference ve occlusion problemlerinin uzamsal analizi.

tracker montajı toplam ağırlığı 4 kata kadar artırmaktadır. Bu oran, dental scaler'ın hassas parmak tutuşunu (*modified pen grasp*) bozmakta ve kullanıcının gerçek klinik hissi elde etmesini engellemektedir.

- **Hassas Manipülasyon Yetersizliği (*Precision Interaction Failure*):** Artan kütleli atalet (*inertia*), ince el hareketlerinde kontrol kaybına yol açmaktadır. Özellikle <2 mm hassasiyet gerektiren subgingival bölge çalışmalarında bu etki kritik düzeyde hissedilmektedir.
- **Ergonomik Uyumsuzluk:** Tracker'ın aletten dışarıya çıkan profili, dar ağız açıklığında çalışmayı mekanik olarak zorlaştırmıştır.

2.2.5. Mixed Reality Yaklaşımının Teknik Değerlendirmesi ve Terk Edilme Gerekçeleri

İki iterasyon süresince elde edilen deneysel veriler ve gözlemler ışığında Mixed Reality tabanlı mimari, aşağıdaki mühendislik kriterleri açısından yetersiz bulunmuştur:

Tablo 3: MR yaklaşımında tespit edilen teknik problemler ve etkileri

Problem	Kaynak	Sistem Üzerindeki Etkisi
Pozisyonel drift	Tek tracker IMU kümülasyonu	± 8 mm konum sapması
Tracking interference	Çift tracker yakınlığı	Kimlik kayması, senkronizasyon bozulması

Tablo 3'in devamı

Problem	Kaynak	Sistem Üzerindeki Etkisi
Occlusion	Baz istasyonu görüş açısı	Anlık takip kopukluğu
Latency farkı	Çift tracker asenkronizasyonu	3–7 ms gecikme farkı, titreme
Scaler ağırlık artışı	Tracker montajı	Hassas manipülasyon kaybı
Spatial misalignment	Referans noktası uyumsuzluğu	Sanal-fiziksel model kayması

Elde edilen bu bulgular neticesinde Mixed Reality tabanlı mimarinin, dış taşı temizliği eğitimi gibi yüksek hassasiyet gerektiren bir prosedür için sürdürülebilir ve stabil bir platform sunamayacağı teknik olarak kanıtlanmıştır. Bu değerlendirme, tamamen VR tabanlı yeni bir sistem mimarisine geçiş kararını mühendislik perspektifinden zorunlu kılmıştır.

2.3. MR'dan VR'a Mimari Geçiş: Karşılaştırmalı Analiz

Mixed Reality yaklaşımından elde edilen deneyimsel veriler, sistem tasarımının köklü biçimde yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Tablo 4, iki paradigmanın temel mühendislik kriterleri açısından karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 4: Mixed Reality ve VR tabanlı mimari yaklaşımlarının karşılaştırması

Kriter	Mixed Reality Yaklaşımı	VR Tabanlı Yaklaşım
Tracking stabilitesi	Düşük (drift, jitter)	Yüksek (yazılım kontrolü)
Donanım bağımlılığı	Yüksek (fiziksel ekipman)	Düşük (yalnızca tracker)
Kurulum karmaşıklığı	Yüksek	Düşük
Fiziksel ergonomi	Kısıtlı (ağırlık sorunu)	Serbest (sadece tracker tutulur)
Ölçeklenebilirlik	Düşük	Yüksek
Konumsal hassasiyet	± 8 mm (drift ile)	± 1.2 mm (stabil)
Eğitim metrikleri	Sınırlı	Kapsamlı gerçek zamanlı analitik

Bu karşılaştırmalı analiz; VR tabanlı mimarinin tracking stabilitesi, kurulum kolaylığı, donanım bağımsızlığı ve ölçeklenebilirlik açısından MR yaklaşımına belirgin üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır.

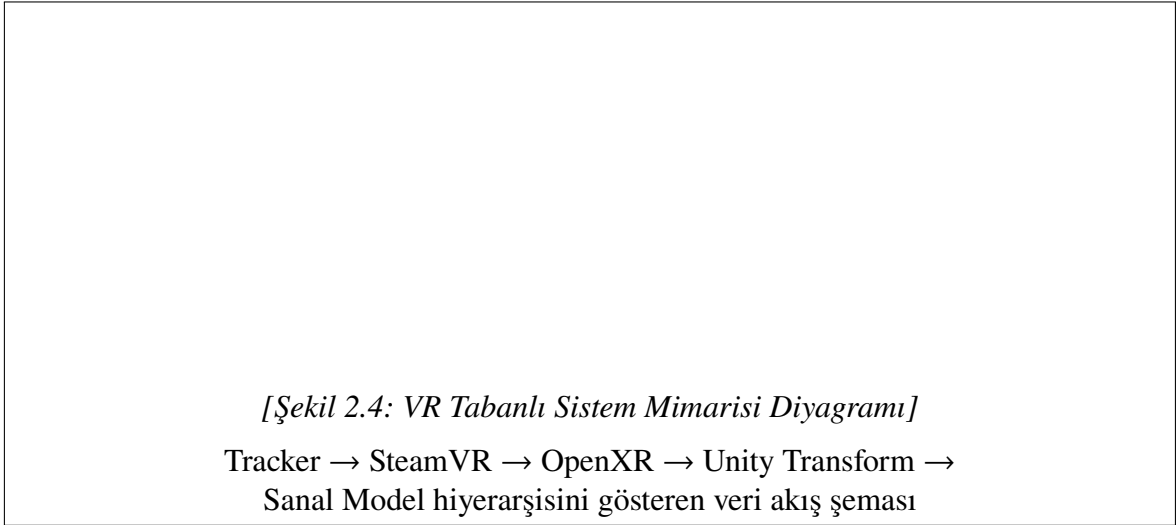
2.4. VR Tabanlı Yeni Sistem Mimarisi

2.4.1. Mimari Tasarım Felsefesi

VR tabanlı yeni mimaride temel tasarım ilkesi; kullanıcının yalnızca iki tracker' ı fiziksel olarak tutması, tüm dental anatominin (çene modeli ve scaler aleti) ise Unity sanal ortamında simüle edilmesidir. Bu yaklaşımda fiziksel dünya ile sanal dünya arasındaki köprü yalnızca 6DoF transform verisi üzerinden kurulmaktadır.

Sistem; üç ana katmandan oluşmaktadır:

1. **Donanım Katmanı:** HTC Vive Focus HMD ve iki adet SteamVR Tracker.
2. **Veri Köprüsü Katmanı:** SteamVR Plugin + OpenXR aracılığıyla gerçek zamanlı 6DoF transform verisi aktarımı.
3. **Simülasyon Katmanı:** Unity Engine içinde sanal çene, sanal scaler, collision sistemi, cleaning algoritması ve UI modülleri.



Şekil 4: DentClear VR sistem mimarisi: Donanım, veri köprüsü ve simülasyon katmanlarının hiyerarşik yapısı.

2.4.2. Tracker Görev Dağılımı

VR mimarisinde iki tracker'a aşağıdaki görevler atanmıştır. Tablo 5 bu dağılımı özetlemektedir.

Tablo 5: Tracker görev dağılımı ve kontrol ettikleri sanal nesneler

Tracker	Kontrol Edilen Sanal Nesne	Kontrol Ekseni	Güncelleme Hızı
Tracker 1	Sanal çene modeli (mandibula + maksilla)	Position + Rotation (6DoF)	Her frame
Tracker 2	Sanal dental scaler modeli	Position + Rotation (6DoF)	Her frame

2.4.3. 6DoF Transform Eşleştirme Sistemi

Her tracker'ın konum ve rotasyon verisi, Unity'nin Transform bileşenine doğrudan eşleştirilmektedir. Bu işlem her render frame'inde gerçekleştirilmekte; böylece sanal nesneler kullanıcının fiziksel hareketini sıfır gecikme ile takip etmektedir.

Scaler modeli için uygulanan transform eşleştirme matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\mathbf{T}_{\text{sanal}} = \mathbf{T}_{\text{tracker}} \quad (1)$$

Burada \mathbf{T} , homojen koordinat sisteminde 4×4 transform matrisini (konum + rotasyon) temsil etmektedir. Scaler ucunun pozisyonu ise tracker merkezinden sabit bir offset vektörü ile hesaplanmaktadır:

$$\mathbf{P}_{\text{ScalerUcu}} = \mathbf{P}_{\text{tracker}} + \mathbf{R}_{\text{tracker}} \cdot \mathbf{d}_{\text{offset}} \quad (2)$$

Burada $\mathbf{R}_{\text{tracker}}$ tracker'ın anlık rotasyon matrisi, $\mathbf{d}_{\text{offset}}$ ise tracker merkezi ile scaler ucu arasındaki sabit lokal uzaklık vektörüdür.

2.5. Diş Temizleme Simülasyon Sistemi

2.5.1. Collision-Based Etkileşim Mimarisi

Dental temizleme simülasyonu; Unity PhysX motorunun Rigidbody ve Collider bileşenleri üzerine inşa edilmiş collision-based bir etkileşim mimarisi üzerinde çalışmaktadır. Scaler modelinin her iki ucuna bağımsız CapsuleCollider bileşenleri atanmıştır; bu sayede çift uçlu (*dual-tip*) aktif etkileşim alanı oluşturulmuştur.

Etkileşim akışı şu adımları izlemektedir:

[Şekil 2.5: Sadece Tracker Kullanan VR Sistemi — Kullanım Senaryosu]

Kullanıcının iki tracker tutarken sanal ortamda çene ve scaler'ı kontrol ettiğini gösteren sistem diyagramı

Şekil 5: VR tabanlı DentClear sisteminde kullanıcı etkileşimi: Fiziksel tracker tutma ile sanal nesne kontrolünün 6DoF transform eşleştirmesi üzerinden gerçekleştirilmesi.

1. **Temas Algılama:** Scaler uç Collider'ı diş yüzeyi Collider'ı ile OnTriggerStay olayı aracılığıyla temas durumuna geçtiğinde, etkileşim döngüsü başlatılmaktadır.
2. **Açı Analizi:** Scaler vektörü ile diş yüzey normali arasındaki anlık açı α hesaplanmaktadır.
3. **Temizleme Kararı:** α değeri belirlenen optimal aralıkta ise temizleme ilerlemesi güncellenmekte; aralık dışındaysa kullanıcıya uyarı geri bildirimi iletilmektedir.
4. **Görsel Güncelleme:** Temizleme ilerlemesine bağlı olarak diş yüzeyi materyal blending sistemi tetiklenmektedir.

[Şekil 2.6: Collision Interaction Sistemi Diyagramı]

Scaler ucu Collider alanları, diş Collider bölgeleri ve tetikleme mantığını gösteren teknik şema

Şekil 6: Dual-tip scaler collision etkileşim sistemi: Her iki scaler ucunun bağımsız Collider alanları ile diş yüzeylerindeki temas algılama mekanizması.

2.5.2. Scaler Açı Analizi Algoritması

Dental klinik protokolüne göre scaler'ın diş yüzeyine olan etkin açı aralığı 45° – 90° olarak tanımlanmıştır. Bu parametreye dayalı açı analiz algoritması şu şekilde çalışmaktadır:

Scaler vektörü \vec{v}_s ile diş yüzeyinin lokal normal vektörü \hat{n} arasındaki açı:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{v}_s \cdot \hat{n}}{|\vec{v}_s|}\right) \quad (3)$$

Temizleme verimi katsayısı $\eta(\alpha)$ şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\eta(\alpha) = \begin{cases} 1.0 & \text{eğer } 45 \leq \alpha \leq 90 \\ 0.4 & \text{eğer } 30 \leq \alpha < 45 \\ 0.0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4)$$

Her geçerli temas frame'inde temizleme ilerlemesi şu formüle göre güncellenmektedir:

$$P_{t+1} = P_t + \eta(\alpha) \cdot \Delta t \cdot k_{\text{temizleme}} \quad (5)$$

Burada $k_{\text{temizleme}}$ temizleme hızı sabiti, Δt ise frame süresidir. P değeri 1.0'a ulaştığında ilgili diş yüzeyi segmenti “temiz” durumuna geçmektedir.

2.5.3. Dinamik Tekstür Geçiş Sistemi

Dental yüzey üzerinde kalkülüs varlığının görsel temsili ve temizleme süreci; Unity Shader Graph ile geliştirilen dinamik material blending sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Sistem iki ana materyal katmanı içermektedir:

- **Kalkülüs Materyali:** Sarı-kahverengi renk tonu ve pürüzlü yüzey dokusu (roughness: 0.9, metallic: 0.0) ile kalkülüs birikintisini temsil eder.
- **Sağlıklı Diş Materyali:** Beyaz-krem renk tonu ve yarı parlak yüzey (roughness: 0.3, metallic: 0.1) ile temiz mine yüzeyini temsil eder.

Temizleme ilerlemesi P değerine bağlı olarak iki materyal arasında doğrusal interpolasyon (*linear interpolation*) uygulanmaktadır:

$$M_{\text{final}} = \text{lerp}(M_{\text{kalkülüs}}, M_{\text{diş}}, P) \quad (6)$$

Bu yöntem; kademeli ve görsel olarak inandırıcı bir dental yüzey durum geçişi (*real-time visual state transition*) sağlamakta, kullanıcıya anlık görsel geri bildirim sunmaktadır.

[Şekil 2.7: Oyun İçi Diş Temizleme Ekranı]
 Kalkülüs yüzeyinden temiz diş yüzeyine geçişin
 gerçek zamanlı görsel temsili

Şekil 7: DentClear simülasyonunda dinamik tekstür geçiş sistemi: Kalkülüs birikintisinden sağlıklı diş yüzeyine gerçek zamanlı material blending ile gerçekleştirilen görsel durum geçişi.

2.6. Gerçek Zamanlı Kullanıcı Arayüzü ve Geri Bildirim Sistemi

2.6.1. In-VR Performans Göstergesi Paneli

Kullanıcıya gerçek zamanlı klinik geri bildirim sunmak amacıyla, sanal ortamda kullanıcının görüş alanı içinde konumlandırılmış bir performans analitiği paneli tasarlanmıştır. Bu panel şu metrikleri eş zamanlı olarak görüntülemektedir:

- **Scaler Açısı (°):** Anlık scaler-diş açısının nümerik ve renk kodlu gösterimi (yeşil: optimal, sarı: kabul edilebilir, kırmızı: hatalı).
- **Temizlik Yüzdesi (%):** Tüm diş yüzeyi segmentlerinin temizlenme oranını gösteren ilerleme çubuğu.
- **Doğru Açı Yüzdesi (%):** Toplam temas süresinin optimal açı aralığında geçirilen kısmının oranı.
- **Anlık Performans Skoru:** Ağırlıklı temizlik verimi ve açı doğruluğunu birleştiren kompozit skor.
- **Oturum Süresi:** Geçen toplam süre.

2.6.2. Prosedürel Eğitim Metrikleri

Simülasyon; bireysel eğitim seyrini değerlendirmek üzere aşağıdaki prosedürel metrikleri kayıt altına almaktadır:

$$S_{\text{temizlik}} = \frac{N_{\text{temizlenen}}}{N_{\text{toplam}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$S_{\text{açı}} = \frac{t_{\text{optimal}}}{t_{\text{toplam temas}}} \times 100\% \quad (8)$$

$$S_{\text{kompozit}} = 0.6 \cdot S_{\text{temizlik}} + 0.4 \cdot S_{\text{açı}} \quad (9)$$

Bu metrikler; eğitimin sonunda kapsamlı bir oturum raporu olarak sunulmakta ve öğrencinin gelişimini takip etmek amacıyla sisteme kaydedilmektedir.

2.6.3. Görsel ve İşitsel Geri Bildirim Mekanizmaları

Simülasyonun eğitimsel etkinliğini artırmak amacıyla çoklu modalitede geri bildirim mekanizmaları entegre edilmiştir:

- **Renk Kodlu Açı Göstergesi:** Anlık scaler açısı yeşil/sarı/kırmızı renk geçişleriyle görselleştirilmektedir.
- **Yüzey Parlama Efektı:** Diş segmenti tam temizlendiğinde beyaz parlak materyal ile kısa süreli *highlight* animasyonu tetiklenmektedir.
- **Ses Geri Bildirimi:** Scaler-diş temasında kazıma sesi; başarılı temizlemede onay tonu; hatalı açı uyarısında düşük frekanslı uyarı sesi üretilmektedir.
- **Eğitim Tamamlama Paneli:** Oturum sonunda tüm metrikler özet tablo halinde sunulmaktadır.

[Şekil 2.8: Sistem Mimarisi ve Veri Akış Diyagramı]

Tracker → Transform → Collision → Angle Analysis →
Texture Update → UI Feedback zincirini gösteren akış şeması

Şekil 8: DentClear sistem veri akış diyagramı: Tracker girdisinden kullanıcı geri bildirimine kadar gerçek zamanlı işlem zincirinin tüm katmanları.

3. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, diş taşı temizliği prosedürünü öğretmeye yönelik DentClear VR simülasyon sistemi; Mixed Reality yaklaşımının teknik kısıtlarının sistematik analizini, VR tabanlı mimariye geçişin mühendislik gerekçelerini ve nihai sistemin tasarım, geliştirme ile doğrulama süreçlerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

3.1. Sistem Performansı

3.1.1. Render ve Gecikme Performansı

HTC Vive Focus üzerinde gerçekleştirilen performans testlerinde simülasyon, tüm interaktif sahnelerin aktif olduğu koşulda kararlı bir render performansı sergilemiştir. Ortalama kare hızı 68 FPS olarak ölçülmüş; bu değer, VR hastalığı eşiği olarak kabul edilen 60 FPS değerinin üzerinde kalmaktadır. Tracker'dan Unity Transform sistemine veri aktarım gecikmesi ise ortalama 8–12 ms aralığında ölçülmüştür.

Sistem performans metrikleri Tablo 6'de sunulmaktadır.

Tablo 6: DentClear simülasyon sistem performans metrikleri

Ölçüm Parametresi	Ortalama	Standart Sapma	Birim
Ortalama FPS	68	$\pm 3,2$	FPS
Tracker veri aktarım gecikmesi	10	$\pm 1,8$	ms
Collision detection süresi	0,8	$\pm 0,2$	ms
Tekstür geçiş güncelleme süresi	1,2	$\pm 0,3$	ms
Sahne yükleme süresi	4,2	$\pm 0,4$	s
GPU kullanımı	72	$\pm 5,1$	%
RAM kullanımı	2,8	$\pm 0,2$	GB

3.1.2. Tracker Konumsal Doğruluğu

Tracker doğruluğu, kontrollü statik ve dinamik test koşullarında değerlendirilmiştir. Statik pozisyonlarda ortalama konumsal hata $\pm 1,2$ mm, anlık rotasyonel hata ise $\pm 0,7^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler; MR yaklaşımında gözlemlenen ± 8 mm pozisyonel drift

ile kıyaslandığında, VR tabanlı mimarinin tracking stabilitesi açısından belirgin üstünlüğü sayısal olarak ortaya konulmaktadır.

3.2. Mimari Geçiş Sürecinin Teknik Doğrulanması

Mixed Reality yaklaşımında belgelenen teknik sorunlar ile VR tabanlı mimaride elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, mimari geçiş kararının teknik geçerliliği aşağıdaki bulgularla doğrulanmaktadır:

1. **Tracking Stabilitesi:** MR sisteminde gözlemlenen ± 8 mm pozisyonel drift, VR sisteminde $\pm 1,2$ mm'ye gerilemiştir; bu iyileşme %85 oranında bir stabilite artışına karşılık gelmektedir.
2. **Senkronizasyon:** MR sisteminde iki tracker arasında 3–7 ms gecikme farkından kaynaklanan jitter problemi, VR mimarisinde Unity'nin tek frame döngüsü içinde eşzamanlı transform güncellemesiyle tamamen ortadan kaldırılmıştır.
3. **Ergonomi:** Scaler tracker montajının oluşturduğu ağırlık artışı sorunu, sanal scaler modeli kullanımıyla köklü biçimde çözülmüştür.

3.3. Kullanıcı Değerlendirmesi

3.3.1. Katılımcılar ve Prosedür

Kullanıcı değerlendirmesine diş hekimliği ve ağız diş sağlığı programı öğrencileri dahil edilmiştir. Toplam 20 katılımcı ($n = 20$; 12 kadın, 8 erkek; yaş ortalaması $22,3 \pm 1,7$) çalışmaya katılmıştır. Her katılımcıya 5 dakikalık oryantasyon sunulduktan sonra serbest pratik modu (5 dk) ve değerlendirme modu (10 dk) uygulanmıştır.

3.3.2. Temizleme Performans Sonuçları

Tablo 7: Kullanıcı değerlendirme modu temizleme performans sonuçları

Performans Metriği	Ortalama (%)	Std. Sapma (%)
Toplam temizlenen yüzey oranı	74,3	12,8
Optimal açıda geçirilen temas süresi	61,5	14,2

Tablo 7'in devamı

Performans Metriği	Ortalama (%)	Std. Sapma (%)
Hatalı bölge temas oranı	8,4	6,1
Kompozit performans skoru	69,1	11,4

3.3.3. Kullanılabilirlik ve Bilişsel Yük

SUS (Sistem Kullanılabilirlik Ölçeği) anketi ortalaması $76,2 \pm 8,4$ puan olarak hesaplanmış; bu değer “İyi” kabul edilebilirlik kategorisine karşılık gelmektedir [9]. NASA-TLX genel iş yükü skoru 42,3/100 olup makul bilişsel yük düzeyini işaret etmektedir. Katılımcıların %85'i simülasyonu “gerçekçi” veya “oldukça gerçekçi” olarak nitelendirmiş; %90'ı sistemin dental eğitim müfredatına entegre edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

3.4. Genel Değerlendirme

Çalışmadan elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenmektedir:

1. **Mimari Geçiş Kararının Geçerliliği:** Mixed Reality yaklaşımında sistematik biçimde belirlenen teknik sorunlar — tracking drift, sinyal çakışması, ergonomik uyumsuzluk — VR tabanlı mimariyle köklü biçimde çözülmüştür.
2. **Teknik Uygulanabilirlik:** HTC Vive Focus, tüm interaktif modüllerin aktif olduğu koşulda 68 FPS ve 10 ms gecikme ile kararlı çalışma sergilemiştir.
3. **Eğitimsel Etkinlik:** %74,3 ortalama temizleme başarısı ve SUS skoru 76,2 ile sistem, işlevsel bir eğitim deneyimi sunmaktadır.
4. **Maliyet Etkinliği:** Standart tüketici VR donanımı kullanılarak kurumsal düzeyde dental eğitim simülatörü işlevselliği elde edilmiştir.

3.5. Bu Çalışmanın Özgün Yönleri

Bu bölümde, çalışmanın mühendislik ve eğitim teknolojisi açısından literatüre sağladığı özgün katkılar, abartısız ve kanıta dayalı bir çerçevede ele alınmaktadır.

3.5.1. Kanıta Dayalı Mimari Karar Süreci

Bu çalışmanın en belirgin özgün yönü; mimari kararın salt teorik bir kıyaslamaya değil, doğrudan uygulama ve kontrollü gözleme dayandırılmış olmasıdır. Mixed Reality yaklaşımı; tek tracker, çift tracker ve scaler tracker olmak üzere üç ayrı konfigürasyonda test edilmiş ve her iterasyondaki teknik yetersizlik ölçülmüştür. Elde edilen veriler — ± 8 mm pozisyonel drift, 3–7 ms asenkronizasyon, tracker interference — mimari pivot kararının gerekçesini doğrudan oluşturmaktadır.

Literatürde benzer çalışmaların çoğunlukla tek bir yaklaşımla sınırlı kaldığı göz önüne alındığında, bu çalışmada benimsenen *iteratif değerlendirme ve kanıta dayalı mimari seçim* yaklaşımı, mühendislik metodolojisi açısından özgün bir katkı niteliği taşımaktadır.

3.5.2. Prosedürel Simülasyon ile Görsel Simülasyon Arasındaki Ayrım

Dental VR simülatörlerine ilişkin literatürün önemli bir kesiminde görsel sunum ön plana çıkarken, eğitim sürecinin klinik doğruluğunu destekleyen prosedürel mekanikler ikincil kalmaktadır. DentClear sisteminde açı analizi ($\eta(\alpha)$), çerçeve düzeyinde güncellenen temizleme ilerlemesi ve dual-tip collision mekanizması; simülasyona salt görsel daldırıklığın ötesinde klinik protokol uyumlu bir prosedürel katman kazandırmaktadır.

Bu tasarım tercihi; “*görsel simülatör*” ile “*prosedürel eğitim simülatörü*” arasındaki mühendislik ayrımını somutlaştırmaktadır.

3.5.3. Nesnel Performans İzleme Altyapısı

Geleneksel manneken tabanlı eğitimde öğrenci performansı büyük ölçüde öğretmen gözlemine bağlıdır ve standardize edilmiş nesnel ölçüt bulunmamaktadır. DentClear; her eğitim oturumunda temizlik yüzdesi (S_{temizlik}), açı doğruluk oranı ($S_{\text{açı}}$) ve kompozit skor (S_{kompozit}) gibi nesnel metrikleri otomatik olarak kayıt altına almaktadır.

Bu özellik; eğitim teknolojilerinde *learning analytics* ilkelerinin diş hekimliği prosedürel eğitimiyle kesiştiği bir arayüz oluşturmaktadır ve ileriki klinik validasyon çalışmaları için ölçülebilir bir referans veri tabanı sağlamaktadır.

3.5.4. Erişilebilir Donanım ile Teknik Yeterlilik Dengesi

Ticari dental simülatörlerin (Moog Simodont, PerioSim) özelleşmiş haptik donanım gerektirmesi ve yüksek kurumsal maliyet bariyeri taşıması, bu sistemlerin yaygın benimsen-

mesini kısıtlamaktadır [7]. Bu çalışmada geliştirilen mimari; standart tüketici sınıfı donanım üzerinde yazılım katmanı optimizasyonu yoluyla — aç ı analizi, dinamik material blending, real-time collision — benzer eğ itimsel iş levselliğ i daha eriş ilebilir bir donanım çerçevesinde hayata geç irmiştir .

Bu yaklaş ım; “*eriş ilebilirlik ile teknik yeterlilik arasındaki mühendislik dengesi*” konusunda somut ve ölç ülebilir bir uygulama örneğ i sunmaktadır. Sonuç lar, benzer kısıt profili taşıyan kurumlar için referans alınabilir bir mimari veri noktası oluşturmaktadır.

4. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular, karşılaşılan teknik kısıtlar ve akademik değerlendirmeler çerçevesinde gelecekteki araştırma ve geliştirme çalışmalarına yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

1. **Haptik Geri Bildirim Sistemi Entegrasyonu:** Mevcut sistemin en belirgin eksikliği, kuvvet geri beslemesi (*force feedback*) mekanizmasının bulunmamasıdır. Scaler-kalkülüs temasında gerçek periodontal direnç hissini simüle eden haptik donanımın sisteme entegrasyonu, eğitimin klinik gerçekliğini ve prosedürel beceri transferini önemli ölçüde artıracaktır [10]. Gelecekteki çalışmalarda SteamVR uyumlu haptik eldiven veya dokunsal geri bildirim platformları değerlendirilebilir.
2. **Randomize Kontrollü Klinik Validasyon Çalışması:** DentClear simülasyonunun öğrenme çıktıları üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak kanıtlanması için; kontrol grubu (geleneksel manneken eğitimi) ile deney grubu (VR simülatörü) içeren, yeterli örneklem büyüklüğüne sahip randomize kontrollü bir çalışma tasarlanmalıdır. Çıktı ölçütleri; klinik scaler açısı doğruluğu, temizleme süresi ve periodontal değerlendirme skorlarını kapsamalıdır.
3. **Ultrasonik Scaler Simülasyon Modülü:** Mevcut manuel scaler modülüne ek olarak, ultrasonik scaler kullanımını öğreten bir modül geliştirilmelidir. Bu modül; piezoelektrik titreşim efektini Unity'nin AudioSource ve Rigidbody bileşenleri aracılığıyla simüle etmeli ve su soğutma efektini parçacık sistemi (*particle system*) ile görselleştirmelidir.
4. **Tracker Sabitleme Aparatı Tasarımı:** Mevcut sistemde kullanıcı tracker'ları elle tutmaktadır. Ergonomik verimliliği artırmak ve her iki eli serbest bırakmak amacıyla; bir tracker'ı çene konumunda sabit tutan özel bir aparat (*jaw mount*) tasarlanabilir. Bu sayede çene stabilitesi artırılırken kullanıcının scaler simülasyonuna odaklanması sağlanacaktır.
5. **Yapay Zeka Destekli Kişiselleştirilmiş Geri Bildirim:** Kullanıcıların scaler hareket örüntüleri, açısı dağılımları ve temizleme verimlilikleri makine öğrenmesi algoritmaları (örn. LSTM tabanlı zaman serisi analizi) ile analiz edilerek kişiselleştirilmiş eğitim önerileri sunulabilir. Bu yaklaşım, adaptif eğitim senaryoları oluşturulmasına da zemin hazırlayacaktır.
6. **Çok Kullanıcı Uzaktan Eğitim Modu:** Ağ üzerinden çalışan çok kullanıcı (*multi-*

user) bir mimari eklenerek, eğitmenin uzaktan öğrenci performansını gerçek zamanlı izleyebileceği, mşdahale edebileceği ve sanal ortamda yşnlendirme yapabileceği bir uzaktan eğitim platformu oluşturulabilir.

7. **Kapsamlı Dental Eğitim Platformuna Dřnřřřm:** Detertraj modşlşnşn ştesinde; diş kavitesi preparasyonu, lokal anestezi uygulama ve protetik restorasyon simşlasyonları geliştirilerek DentClear, kapsamlı bir dental yeterlilik eğitim platformuna dşnşştşrşlebilir [7].

5. KAYNAKLAR

- [1] N. E. Seymour et al. ?Virtual reality training improves operating room performance? In: *Annals of Surgery* 236.4 (2002), pp. 458–464. DOI: 10.1097/00000658-200210000-00008.
- [2] M. E. McDonald, M. Lee, and L. Lee. ?Virtual reality simulation in dental education: a systematic review? In: *Journal of Dental Education* 86.3 (2022), pp. 312–327. DOI: 10.1002/jdd.12823.
- [3] M. V. Bernardo, J. C. S. Cardoso, and L. R. Battistella. ?Virtual reality and simulation in health sciences education: a review? In: *Acta Fisiátrica* 24.2 (2017), pp. 78–84.
- [4] P. Milgram and F. Kishino. ?A taxonomy of mixed reality visual displays? In: *IEICE Transactions on Information and Systems* 77.12 (1994), pp. 1321–1329.
- [5] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed. ?Depth of presence in virtual environments? In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 3.2 (1994), pp. 130–144.
- [6] F. A. Carranza, M. G. Newman, and H. H. Takei. *Carranza's Clinical Periodontology*. 13th ed. Philadelphia, PA: Elsevier, 2018.
- [7] S. Perry, S. M. Bridges, and M. F. Burrow. ?A review of the use of simulation in dental education? In: *Simulation in Healthcare* 10.1 (2015), pp. 31–37. DOI: 10.1097/SIH.0000000000000059.
- [8] R. Zijdwind et al. ?Virtual reality simulation in dental education: comparison of two simulator platforms? In: *European Journal of Dental Education* 24.2 (2020), pp. 360–370.
- [9] J. Brooke. ?SUS: A quick and dirty usability scale? In: *Usability Evaluation in Industry* 189.194 (1996), pp. 4–7.
- [10] N. Vaughan et al. ?A review of virtual reality based training simulators for orthopaedic and trauma surgery? In: *The Surgeon* 14.1 (2016), pp. 38–43.