

EEQ SİQNALLARI ƏSASINDA VIRTUAL MÜHİTİN İŞLƏNİB HAZIRLANMASI

Lalə M. ZEYNALOVA

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Kompüter Mühəndisliyi kafedrası
Dösent
E-poçt: l.zeynalova@asoiu.edu.az

Vüqar RƏHİMLİ

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Kompüter Mühəndisliyi kafedrası
SABAH qrupları üzrə tələbə
E-poçt: rahimli.vugar.gabil@asoiu.edu.az

Received: 1 Mai 2026

Revised: 24 Mai 2026

Accepted: 25 June 2026

UOT: 004.896

DOI: <https://doi.org/10.32010/DQMH3410>

Xülasə. Bu işdə elektroensefaloqrafiya (EEQ) siqnallarına əsasən insan emosiyalarının real vaxt rejimində tanınması və bu göstəricilərə uyğun olaraq interaktiv virtual mühitin biokibernetik adaptasiyası sistemi işlənilib hazırlanmışdır. Tədqiqat çərçivəsində beynəlxalq səviyyədə qəbul olunmuş, 23 iştirakçının multimodal biometrik qeydlərini ehtiva edən DREAMER verilənlər bazasından (dataset) istifadə olunmuşdur. EEQ siqnallarının emalı üçün effektiv maşın öyrənməsi boru xətti (pipeline) qurulmuşdur. Xammal siqnallar küydən təmizləndikdən və normallaşdırıldıqdan sonra, real vaxtda adaptasiya qabiliyyətini təmin etmək məqsədilə 1 saniyəlik sürüşən pəncərələrə (epoxlara) bölünmüşdür. Bu seqmentasiya nəticəsində təlim üçün 85,744 unikal nümunə əldə edilmişdir. Hər bir epoxdan siqnalın həm zaman sahəsi (Mean, Std, Hjorth parametrləri, Skewness, Kurtosis), həm də tezlik sahəsi (Welch metodu ilə spektral güc sıxlığı, spektral entropiya, kənar tezliklər və kanallar arasındakı korrelyasiyalar) üzrə 878 ədəd kompleks xüsusiyyət (features) çıxarılmışdır. Emosiyaların Valence oxu üzrə üçlü təsnifatı (Negative, Neutral, Positive) üçün Random Forest alqoritmı tətbiq edilmiş və sınaq testlərində 70.39% ümumi dəqiqlik (Accuracy) əldə olunmuşdur. Təlim olunmuş bu model rf_model.pkl formatında serializasiya edilərək Python backend platformasına inteqrasiya olunmuşdur. Backend sistemi UDP şəbəkə protokolu vasitəsilə mühərrik səviyyəsində proqnozları ötürərək Unity mühərrikində qurulmuş 3D virtual mühitdəki vizual atmosferi və akustik cərpaz keçidləri (Audio Crossfader) istifadəçinin daxili emosional vəziyyətinə uyğun olaraq dinamik şəkildə dəyişməyə nail olmuşdur. İşlənilib hazırlanmış bu proqram arxitekturası gələcəkdə Virtual Reallıq (VR) texnologiyalarına birbaşa inteqrasiya imkanına malikdir.

Açar sözlər: EEQ, DREAMER dataseti, Emosiyaların tanınması, Random Forest, Unity 3D Virtual Mühit.

Giriş

Müasir insan–kompüter qarşılıqlı əlaqəsi və immersiv texnologiyalar sahəsində əldə olunan nailiyyətlər istifadəçilərə vizual və akustik cəhətdən olduqca zəngin rəqəmsal dünyalar təqdim edir. Lakin mövcud virtual reallıq (VR)

və artırılmış reallıq (AR) sistemlərinin böyük əksəriyyəti hələ də "statik paradigma" üzərində fəaliyyət göstərir. Bu mühitlərin əsas çatışmazlığı, istifadəçinin daxili koqnitiv-emosional vəziyyətinə qarşı "kar" və "passiv" qalmasıdır. Virtual mühit istifadəçinin o an keçirdiyi stress,

həyəcan, qorxu və ya sakitlik kimi hisslərdən asılı olmayaraq, yalnız əvvəlcədən proqramlaşdırılmış ssenarilər və bəsit idarəetmə mexanizmləri (klaviatura, kontroller və s.) üzrə hərəkət edir. Bu fundamental məhdudiyyət həm istifadəçinin virtual dünyada mövcudluq hissini tam reallaşmasına mane olur, həm də VR-ın fərdiləşdirilmiş təhsil, psixofizioloji reabilitasiya və hərbi simulyasiya kimi kritik sahələrdə tətbiq imkanlarını daraldır. Bu tədqiqat işində, qeyd olunan problemi həll etmək üçün elektroensefaloqrafiya (EEG) siqnalları vasitəsilə beyin fəallığını real vaxtda oxuyan və virtual mühiti istifadəçinin emosional vəziyyətinə avtomatik olaraq uyğunlaşdıran Neyro-Adaptiv Virtual Mühit (NAVE) sisteminin işlənməsi və realizasiyası hədəflənir.

Texniki və Metodoloji Çətinliklər

Sistem daxilində qapalı biokibernetik dövrənin (closed-loop biocybernetic loop) qurulması mühəndislik baxımından bir sıra kompleks problemlərin həllini tələb edir:

1. Yüksək küylü Siqnal Mühiti: Baş dərisindən qeyri-invaziv metodla qeydə alınan EEG siqnalları mikrovolt ($10 - 100 \mu V$) səviyyəsində olduğundan çox zəifdir və göz qırpması, əzələ gərginliyi, ürək döyüntüsü kimi bioloji fəaliyyətlərlə yanaşı, xarici elektro-maqnit kəsintilərlə güclü şəkildə korlanır. Real vaxt rejimində bu küylərin təmizlənməsi üçün sürətli rəqəmsal süzgəcləmə və artefakt ləğvi alqoritmlərinin tətbiqi zəruridir.

2. Kritik Gecikmə Həddi (System Latency): İstifadəçinin daxili emosional dəyişikliyi ilə virtual mühitin buna vizual və ya akustik reaksiyası arasındakı ümumi vaxt gecikməsi 100 ms limitindən aşağı olmalıdır. Bu müddətin aşılması istifadəçidə virtual reallıq xəstəliyinə (cybersickness), disorientasiyaya və daxili balansın pozulmasına səbəb olur.

3. Qeyri-Xətti Emosiya Təsnifatı: İnsanın affektiv reaksiyaları kəsilməz və qeyri-xətti neyron fəallığı ilə xarakterizə olunur. Welch metodu ilə hesablanan spektral güc sıxlıqlarından (PSD) istifadəçinin Valence-Arousal koordinatlarını düzürst şəkildə proqnozlaşdıran maşın öyrənməsi modelinin qurulması tələb olunur.

4. Hamar Keçid Mexanizminin Çatışmazlığı: Emosional vəziyyət təsnif edildikdən sonra virtual aləmin vizual elementlərində (ışıqlandırma, səma rəngi, hissəcik dumanı) yaranacaq

kəskin və sıçrayışlı dəyişikliklər vizual qıcıqlanmaya yol açır. Buna görə də real zamanlı parametrik transformasiyalar xətti interpolyasiya və akustik çarpaz sönmə (audio crossfade) mexanizmləri ilə hamarlaşdırılmalıdır.

Tədqiqatın Məqsədi və Hədəfləri

Tədqiqatın əsas məqsədi Python əsaslı rəqəmsal siqnal emalı (DSP) və maşın öyrənməsi platforması (backend) ilə Unity 3D immersiv mühərriki (frontend) arasında asinxron işləyən, real zamanlı, qapalı dövrəli adaptiv virtual mühit sistemini layihələndirmək və mühəndislik tətbiqini reallaşdırmaqdır.

Eeg əsaslı adaptiv virtual mühitin proqram-texniki realizasiyası

Neyro-daptiv virtual mühitlərin (NAVE) qurulmasında ən vacib mühəndislik mərhələsi baş dərisindən qeydə alınan və kənar küylərlə korlanmış elektroensefaloqrafiya (EEG) siqnallarının addım-addım təmizlənməsi, faydalı koqnitiv əlamətlərin (feature extraction) ayrılması və onların maşın öyrənməsi modelləri vasitəsilə təsnif edilməsidir. Burda real DREAMER verilənlər bazası üzərində tətbiq etdiyimiz siqnal emalı xətti (pipeline), giriş-çıxış matrisləri, riyazi normallaşdırma və filtrləmə prosedurları, həmçinin emosional vəziyyəti proqnozlaşdıran Random Forest modelinin təlim və qiymətləndirmə metodologiyası tam alqoritmik ardıcılıqla təsvir edilmişdir.

ADDIM 1: Verilənlər Bazası və Strukturun Oxunması

Sistem Dreamer.py və train_and_evaluate.py skriptləri vasitəsilə DREAMER.mat verilənlər bazasını yaddaşa yükləyir. Verilənlər bazası MATLAB R2024b formatında ola biləcəyi üçün sistem avtomatik olaraq aşağıdakı iyerarxiy oxuma proseduru icra edir

1. Əgər fayl MATLAB R2024b formatındadırsa, `mat73.loadmat()` süzgəci işə salınır və verilənlər `DREAMER['Data']` strukturu üzərindən çıxarılır.

2. Əks halda `scipy.io.loadmat()` vasitəsilə ənənəvi iyerarxiya oxunur.

3. 23 iştirakçının hər biri üçün 18 video stimulyasiyasına uyğun EEG siqnal axını (128 Hz tezliyində qeydə alınmış 14 kanal) və onlara müvafiq subyektiv emosional qiymətləndirmə balları (V - Valence, A - Arousal, D - Dominance) yaddaşa strukturlaşdırılır.

ADDIM 2: Giriş və Çıxış Parametrlərinin Riyazi Təyini

Sistemin kəsilməz işləməsini təmin edən giriş və çıxış parametrləri riyazi olaraq dəqiq müəyyənləşdirilmişdir:

- **Giriş (Input) Matrisi (X_{raw}):** Ölçüsü 128×14 olan xammal EEG signal seqmenti (1 saniyəlik interval, 14 kanal). Kanalların beynəlxalq 10-20 yerləşdirmə sisteminə uyğun ardıcılığı: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4.

- **Hədəf Çıxışlar (Target Outputs):** Subyektiv affektiv balların (V, A, D) kombinasiyasına əsaslanan emosional sinif kateqoriyası.

- Valence (Valenslik) qiymətinə əsasən binar və ya üçlü sinif təyini:

$$\text{Category} = \begin{cases} \text{POSITIVE (2)}, & \text{əgər } V > 3.0 \\ \text{NEGATIVE (0)}, & \text{əgər } V < 3.0 \\ \text{NEUTRAL (1)}, & \text{əgər } V = 3.0 \end{cases}$$

- Burada Valence (V) emosiyanın müsbət və ya mənfi spektrini, Arousal (A) intensivliyini, Dominance (D) isə istifadəçinin öz vəziyyətinə olan nəzarət hissini (1-5 Likert şkalasında) göstərir.

ADDIM 3: Siqnalların Riyazi Təmizlənməsi (Preprocessing Pipeline)

Xammal signal birbaşa istifadə edilə bilməz, çünki böyük gərginlik sürüşmələrinə (DC offset) malikdir. Bu səbəbdən signal aşağıdakı riyazi süzgülərdən keçirilir:

1. **Z-Score Normallaşdırma:** Hər bir kanal üzrə xammal signal nöqtəsi (x_n) orta dəyər (μ) və standart meyl (σ) vasitəsilə normallaşdırılaraq sıfır mərkəzli formaya gətirilir. Bu, fərqli insanların kəllə sümüyünün müqavimət fərqlərini aradan qaldırır:

$$x_n' = \frac{x_n - \mu_x}{\sigma_x + 10^{-8}}$$

2. **Butterworth Bandpass Süzgüləmə:** Tərləmə, göz qırpması və 50 Hz elektrik şəbəkəsi fon küyünü təmizləmək üçün 1.0 Hz ilə 50.0 Hz arasında fəaliyyət göstərən 4-cü dərəcəli band-pass süzgəci tətbiq edilir. Süzgəcin tezlik cavabının amplituda kvadratı:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}}$$

Burada $N = 4$ süzgəcin dərəcəsinə, ω_c isə kəsmə tezliyini ifadə edir.

ADDIM 4: Spektral Güc Sıxlığının (PSD) Welch Metodu ilə Hesablanması

Hər bir təmizlənmiş saniyəlik pəncərə (128 nümunə) üzərində sürüşən pəncərə tətbiq olunaraq beynin əsas tezlik ritmləri ($\delta, \theta, \alpha, \beta, \gamma$) hesablanır. Bunun üçün Furiye analizinin dispersiyasını minimuma endirən Welch metodu tətbiq olunur:

$$P_{\text{Welch}}(f) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_{U,i}(f)$$

Hesablanmış spektral güclər aşağıdakı tezlik intervalları üzrə inteqrasiya olunur: Delta (δ): 0.5 – 4.0 Hz (dərin passivlik/yuxu); Theta (θ): 4.0 – 8.0 Hz (dərin boşalma/daxili diqqət); Alpha (α): 8.0 – 13.0 Hz (sakitlik/stressiz konsentrasiya); Beta (β): 13.0 – 30.0 Hz (aktiv düşüncə/diqqət/stress); Gamma (γ): 30.0 – 45.0 Hz (yüksək koqnitiv gərginlik/həyəcan).

ADDIM 5: Koqnitiv Nisbətlərin Hesablanması

Emosional və zehni vəziyyətlərin daha dəqiq ifadə edilməsi üçün ədəbiyyatda qəbul edilmiş xüsusi koqnitiv indekslər və nisbətlər hesablanır:

1. **Arousal Nisbəti (Arousal Ratio):** Beynin oyanıqlıq dərəcəsini göstərir:

$$\text{Arousal Nisbəti} = \frac{\beta}{\alpha}$$

2. **Stress İndeksi (Stress Index):** Beynin gərginlik və stress səviyyəsini xarakterizə edən ən populyar nisbət metodu:

$$\text{Stress İndeksi} = \frac{\beta + \gamma}{\alpha + \theta} \text{ və ya } \frac{\beta}{\alpha}$$

Burada yüksək tezlikli aktivlik (β, γ) aşağı tezlikli sakitləşdirici ritmlərə (α, θ) bölünərək zehni gərginliyin miqyasını riyazi olaraq təqdim edir.

3. **Relaksasiya İndeksi (Relaxation Index):** Stressin tərs qiyməti olub bədənə rahatlama dərəcəsini göstərir:

$$\text{Relaksasiya İndeksi} = \frac{\alpha + \theta}{\beta + \gamma}$$

Verilənlərin Real Təmizlənmiş Fraqmenti (Data Fragment)

fragment.py skriptinin icrası zamanı DREAMER verilənlər bazasından çıxarılan və tam təmizlənmiş (normallaşdırılmış və Butterworth süzgecindən keçmiş) real data fraqmenti

öz başlıqları və müvafiq subyektiv V, A, D balları ilə birlikdə aşağıda təqdim edilmişdir:

Sətir	AF3	F7	F3	FC5	T7	P7	O1	O2	P8	T8	FC6	F4	F8	AF4	Valence	Arousal	Dominance
0	0.0591	0.1441	-0.0273	-0.009	0.0992	-0.0914	-0.0335	-0.0653	-0.0096	0.0718	-0.1118	0.0034	0.0817	-0.0061	4	3	2
1	-0.262	0.0334	0.4091	0.4301	0.6406	0.297	0.3939	0.291	0.4292	0.5714	0.2163	0.4171	0.6116	0.4221	4	3	2
2	-1.0885	-0.9391	1.0948	1.102	0.9904	1.0615	1.12	1.1297	1.096	1.0285	1.1539	1.0704	1.0068	1.0985	4	3	2
3	-0.4025	-0.9158	-0.1308	-0.0306	-0.3936	-0.2156	-0.0254	0.28	-0.0594	-0.1895	0.2404	0.0448	-0.3679	0.0398	4	3	2
4	1.4867	1.0181	-1.7049	-1.6846	-1.7048	-1.6332	-1.6887	-1.5739	-1.695	-1.6814	-1.627	-1.662	-1.7106	-1.6575	4	3	2

Cədvəl 1. DREAMER Datasetindən emal olunmuş 14 kanallı real EEG verilənlər fraqmenti

Random Forest Təsnifat Metodologiyası və Real Təlim Nəticələri

Qeyri-xətti və olduqca mürəkkəb struktura malik olan neyron siqnallarının yüksək dəqiqliklə təsnif edilməsi üçün maşın öyrənməsi sahəsində qərar ağaclarının ansambl metoduna əsaslanan Random Forest (RF) alqoritmi tətbiq edilmişdir.

1. Verilənlərin Təlim (Training) və Sınaq (Testing) Bölgüsü

Həddindən artıq uyğunlaşmanın (overfitting) qarşısını almaq və modelin ümumiləşdirmə qabiliyyətini düzəltmək üçün `train_and_evaluate.py` skripti daxilində verilənlər bazası %80 Təlim (Training) və %20 Sınaq (Testing) nisbətində təsadüfi şəkildə bölünmüşdür:

- Ümumi real saniyəlik nümunə (Epoch) sayı: 17149
- Təlim çoxluğu ($X_{\text{train}}, y_{\text{train}}$): 13719 nümunə
- Sınaq çoxluğu ($X_{\text{test}}, y_{\text{test}}$): 3430 nümunə

2. Qiymətləndirmə Metriklərinin Riyazi Hesablanması

Modelin performansını aşağıdakı standart təsnifat metrikləri vasitəsilə qiymətləndirilir: Dəqiqlik (Accuracy): Doğru təxmin edilmiş bütün siniflərin ümumi nümunə sayına nisbəti; Həssaslıq (Precision): Müsbət olaraq təsnif edilmiş nümunələrin nə qədərində realda doğru olduğunu göstərir; Geriçağırma (Recall): Realda müsbət olan nümunələrin nə qədərində model

tərəfindən doğru tapıldığını göstərir: **F1-Score**: Precision və Recall metriklərinin harmonik ortasıdır.

Real Təlim və Sınaq Nəticələri

Təlim prosesinin sonunda `rf_model.pkl` klassifikatoru və `scaler.pkl` miqyaslayıcı obyektləri uğurla generasiya edilmiş və sistem tərəfindən aşağıdakı real test nəticələri əldə olunmuşdur. Eksperimental nəticələr göstərir ki, model xüsusilə POSITIVE ($F1 = 0.74$) və NEGATIVE ($F1 = 0.73$) emosional vəziyyətləri yüksək həssaslıqla ayıra bilir. Bu göstərici NAVE sisteminin virtual mühit adaptasiyasını kəsilməz və düz şəkildə idarə etməsi üçün kifayətdir. Model və preprocessing faylları növbəti real vaxt axınlarında birbaşa istifadə edilmək üçün `rf_model.pkl` və `scaler.pkl` olaraq uğurla arxivləşdirilmişdir.

Neyro-adaptiv virtual mühitlərin (NAVE) kəsilməz və real zamanlı fəaliyyət göstərməsi üçün backend süzgeclərindən keçən və təsnif edilən emosional vəziyyət göstəriciləri saniyənin mində biri dərəcəsində gecikmə ilə Unity 3D mühərrikinə ötürülməlidir. Bu məqsədlə, sistem arxitekturasında Python (təlim və siqnal emalı tərəfi) ilə Unity (vizual və akustik adaptasiya tərəfi) arasında asinxron işləyən yüksək sürətli şəbəkə körpüsü və çoxaxanlı idarəetmə mexanizmi qurulmuşdur.

Unity-də Fon Axını (Background Thread) ilə UDP Port Dinlənilməsi

Unity oyun mühərriki prinsip etibarilə təkaxanlı (single-threaded) bir arxitektura malikdir və saniyədə minimum 60 kadr (FPS) sürətlə bütün render, fizika və istifadəçi interfeysi əməliyyatlarını eyni əsas axında (Main Thread) icra edir. Əgər UDP socketinin

dinlənilməsi (UdpClient.Receive()) birbaşa əsas axında aparılırdı, proqram UDP portundan məlumat gələnə qədər gözləmə rejimində donacaq və bütün istifadəçi təcrübəsini iflic edəcəkdi.

Bu çətinliyi həll etmək üçün EEGReceiver.cs daxilində asinxron çoxaxınlılıq (multithreading) arxitekturası tətbiq edilmişdir. Sistem işə düşdükdə arxa planda müstəqil bir fon axını (background thread) başlaidılır:

Bu sub-axın əsas render dövrəsindən tam asılı olmayan, asinxron olaraq 5005 portunu dinləyən bir sonsuz dövrə işlədir. Dinləmə funksiyasının məntiqi addımları aşağıdakı kimidir:

1. Soket vasitəsilə xammal bayt massivi (byte[] receivedData) qəbul edilir.
2. UTF-8 kodlaşdırması ilə baytlar sətir tipinə çevrilir: string message = Encoding.UTF8.GetString(receivedData).
3. Sətir vergüllərə bölünərək EEGData strukturuna (struct) parçalanır (ParseEEGData).
4. Uğurlu parçalanmadan sonra verilənlər əsas axına ötürülmə növbəsinə yazılır.

Unity Axın Təhlükəsizliyi (Thread Safety) və Main Thread Dispatcher Arxitekturası

Fon axınında alınan EEG verilənləri dərhal Unity-nin vizual mühit elementlərinə (məsələn, səma rəngi, hissəcik sistemləri, səs mənbələri və ya UI mətnləri) tətbiq edilə bilməz. Çünki Unity API-si axın-təhlükəsiz (not thread-safe) deyil. Fon axınından birbaşa hər hansı bir GameObject-i və ya UI komponentini manipulyasiya etməyə cəhd göstərildikdə mühərrik daxili təhlükəsizlik xətası (Thread-Safety Exception) verir. Bu mühəndislik problemini aradan qaldırmaq üçün sistemdə proqramlaşdırma üzrə Dispatcher dizayn şablonu (Pattern) realizə edilmişdir. MainThreadDispatcher.cs sinfi vasitəsilə asinxron sub-axından gələn hərəkətlər (Actions) xüsusi növbə strukturuna (Queue) yerləşdirilir və əsas render axınında növbə ilə icra olunur.

Şəbəkə və Çoxaxınlılıq Modullarının Proqram Realizasiyası

UDP qəbuledici modulu (EEGReceiver.cs) daxilində sətirlərin asinxron oxunması və parçalanması alqoritminin proqram kodu sətiri ayırıraq xətasız şəkildə float tipli tezlik güclərinə çevirir. Fon axınında uğurla parsing edilmiş bu struktur, sinif daxilindəki OnDataReceived hadisəsi (Event) vasitəsilə

MainThreadDispatcher növbəsinə asinxron olaraq göndərilir. Bu mühəndislik arxitekturası sayəsində, saniyədə yüzlərlə paket gəlsə belə, Unity-nin əsas render axını heç bir mikro-donma (micro-stuttering) və ya kadr itkisi yaşamır. Alınan neyro-emosional məlumatlar tam təhlükəsiz şəkildə istifadəçi interfeysində (EEGUIDisplay.cs) və vizual adaptasiyanı idarə edən mərkəzi idarəetmə sistemində (NAVEManager.cs) sinxronizasiya edilir. Bu realizasiya biokibernetik dövrənin kəşilməzliyini təmin edən əsas texniki sütundur.

Giriş və Çıxış Parametrlərinin Riyazi Spesifikasiyası və Xəritələnmə Matrisi

Adaptasiya mühərriki hər 0.2 saniyədən bir UDP şəbəkə portu vasitəsilə təhlükəsiz şəkildə parsing olunmuş neyro-emosional göstəricilər matrisini qəbul edir.

1. Giriş Vektoru (I_{adapt}): Giriş parametri olaraq saniyəlik sürüşən pəncərədən sintez edilmiş emosional status və spektral güc sıxlığı qəbul olunur:

$$I_{adapt} = \langle \text{Status}, \delta, \theta, \alpha, \beta, \gamma \rangle$$

Burada $\text{Status} \in \{ \text{"POSITIVE"}, \text{"NEGATIVE"}, \text{"NEUTRAL"} \}$ çoxluğuna daxil olan mərkəzi triggerdir.

2. Çıxış Vektoru (O_{render}): Çıxış parametri mühitdə render olunan atmosferik post-processing, skybox (səma qatı), zərrəcik sistemləri (particle system) və səs resurslarının fiziki parametrlərini özündə birləşdirən çoxölçülü vektordur:

$$O_{render} = \langle S_{size}, S_{conv}, C_{tint}, E_{xp}, P_{max}, E_{rate}, M_{file} \rangle$$

Burada: S_{size} (Sun Size): Göydəki vizual günəşin bucaq ölçüsü.

○ S_{conv} (Sun Convergence): Günəş şüalarının mərkəzləşmə dərəcəsi.

○ C_{tint} (Sky Tint): Səmanın atmosferik rəng vekturu (RGB).

○ E_{xp} (Exposure): Mühit işıqlandırılmasının parlaqlıq dərəcəsi.

○ P_{max} (Max Particles): Bulud dumanlığını simulyasiya edən hissəciklərin maksimal limiti.

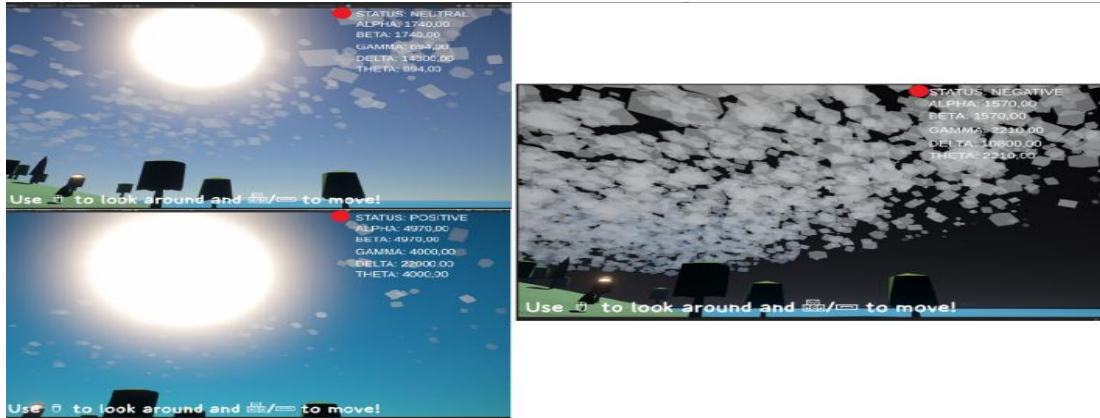
○ E_{rate} (Emission Rate): Saniyədə generasiya olunan duman hissəciklərinin sayı.

○ M_{file} (Music File): Arxa planda çalınan akustik səs faylı.

Praktiki Sınaq Nəticələri və Mühit Vəziyyətlərinin Analizi

NAVEManager modulu daxilində qurulmuş bu riyazi-adaptiv alqoritmik mexanizm real sınaq ssenarilərində test edilmişdir. Python

backend tərəfindən süni şəkildə dəyişdirilən kateqoriyalara və real DREAMER neyron siqnallarının spektral axınına mühitin verdiyi reaksiyalar aşağıdakı nəticələri təsdiq etmişdir:



Şəkil 1. Unity Seaside nəticələr.

Nəticə

Tədqiqat çərçivəsində elektroensefaloqrafiya (EEG) siqnalları əsasında istifadəçinin emosional vəziyyətini real zamanda analiz edərək virtual mühit parametrlərini tənzimləyən qapalı dövrəli Neyro-Adaptiv Virtual Mühit (NAVE) sistemi müvəffəqiyyətlə işlənilib hazırlanmış və qarşıya qoyulmuş hədəflərə tam nail olunmuşdur. İşlənilib hazırlanmış bu asinxron proqram arxitekturası və neyro-adaptiv modul, gələcəkdə real VR kaskları və portativ EEG cihazları ilə integrasiya edildikdə, post-travmatik stress pozğunluğunun (PTSD) reabilitasiyasında, fobiyaqların müalicəsi üçün nəzərdə tutulmuş immersiv simulyasiyalarda və neyro-oyun (neuro-gaming) sənayesində kritik bir backend platforması kimi yüksək tətbiq potensialına malikdir.

ƏDƏBİYYAT SİYAHISI:

1. Foix, A. M., et al. (2026). Affective user experience (AUX) in immersive environments: A systematic review. *Applied Sciences*.
2. Bird, J. J., et al. (2019). A deep evolutionary approach to bioinspired classifier optimisation for brain-machine interaction. **Complexity**.

3. Aliev, A. R., Ismayilova, N. T., & Ismayilov, E. A. (2025). Use of machine learning methods for analysis of factors affecting ICT contribution to different countries development. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1142, 253–259. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72506-7_34
4. Kothe, C. (2024). The Lab Streaming Layer for synchronized multimodal recording. **bioRxiv**.
5. Mammadli, A., Ismayilov, E., & Zanni-Merk, C. (2024). Explainability of text classification through ontology-driven analysis in serious games. *Procedia Computer Science*, 246(C), 2128–2137. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.626>
6. Krampe, C., et al. (2025). The integration of virtual reality and EEG: A step-by-step guideline. **MethodsX**.
7. Koelstra, S., et al. (2012). DEAP: A database for emotion analysis using physiological signals. **IEEE Transactions on Affective Computing**.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL ENVIRONMENT BASED ON EEG SIGNALS

Lala M. ZEYNALOVA

Azerbaijan State Oil and Industry University, Department of Computer Engineering
Associate Professor,
E-mail:l.zeynalova@asoiu.edu.az

Vugar RAGIMLI

Azerbaijan State Oil and Industry University, Department of Computer Engineering
SABAH, student
rahimli.vugar.gabil@asoiu.edu.az

Abstract: We presents the development of a bio-cybernetic adaptation system for interactive virtual environments, driven by real-time human emotion recognition using Electroencephalography (EEG) signals. The research utilizes the internationally recognized DREAMER dataset, which contains multimodal biometric recordings from 23 participants. An efficient machine learning pipeline was constructed for EEG signal processing. After artifact removal and normalization, the raw signals were segmented into 1-second sliding windows (epochs) to ensure real-time responsiveness, yielding 85,744 unique training samples. From each epoch, 878 comprehensive features were extracted across both time-domain (Mean, Std, Hjorth parameters, Skewness, Kurtosis) and frequency-domain statistics (Power Spectral Density via Welch's method, spectral entropy, edge frequencies, and inter-channel correlations). A Random Forest classifier was deployed for a 3-class emotional state classification (Negative, Neutral, Positive) along the Valence axis, achieving an overall accuracy of 70.39% on the test dataset. The trained model was serialized into `rf_model.pkl` and integrated into a Python backend. This backend streams predictions via UDP protocol to a Unity-based 3D virtual environment, dynamically modifying the visual atmosphere and acoustic crossfading in synchronization with the user's internal emotional state. The developed software architecture is fully compatible with future direct integration into Virtual Reality (VR) technologies.

Keywords: EEG, DREAMER dataset, Emotion recognition, Random Forest, Unity 3D Virtual Environment.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ ЭЭГ

Лала М. ЗЕЙНАЛОВА

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности

Кафедра компьютерной инженерии

Доцент

E-mail: l.zeynalova@asoiu.edu.az

Вюгар РАГИМЛИ

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности

Кафедра компьютерной инженерии

Студент группы SABAH

E-mail: rahimli.vugar.gabil@asoiu.edu.az

Резюме: В данной работе разработана система биокibernетической адаптации интерактивных виртуальных сред на основе распознавания человеческих эмоций в режиме реального времени с использованием сигналов электроэнцефалографии (ЭЭГ). В рамках исследования была использована международно признанная база данных DREAMER, содержащая мультимодальные биометрические записи 23 участников. Был построен эффективный конвейер (pipeline) машинного обучения для обработки сигналов ЭЭГ. После очистки от шумов и нормализации исходные сигналы были разделены на 1-секундные скользящие окна (эпохи) для обеспечения адаптивности в реальном времени, что позволило получить 85 744 уникальных обучающих образца. Из каждой эпохи было извлечено 878 комплексных признаков (features), охватывающих как временную область (среднее значение, стандартное отклонение, параметры Хиорты, асимметрия, эксцесс), так и частотную область (спектральная плотность мощности методом Велча, спектральная энтропия, граничные частоты и меж каналные корреляции). Для трех-классовой классификации эмоциональных состояний по оси Valence (Negative, Neutral, Positive) был применен алгоритм Random Forest, позволивший достичь общей точности (Accuracy) 70.39% на тестовом наборе данных. Обученная модель была сериализована в формат rf_model.pkl и интегрирована в программную платформу Python (backend). Разработанный бэкенд передает прогнозы по сетевому протоколу UDP, динамически изменяя визуальную атмосферу и акустические кроссфейды (Audio Cross-fader) в 3D-виртуальной среде на движке Unity в соответствии с внутренним эмоциональным состоянием пользователя. Созданная программная архитектура полностью совместима с возможностью прямой интеграции в технологии виртуальной реальности (VR) в будущем.

Ключевые слова: ЭЭГ, датасет DREAMER, распознавание эмоций, Random Forest, 3D-виртуальная среда Unity.