# hp Engine: Otonom Futbol Video Analiz Sistemi İçin Kapsamlı Teknik, Stratejik ve Felsefi Araştırma Raporu

## 1. Yönetici Özeti ve Stratejik Vizyon

Bu kapsamlı araştırma raporu, hp Engine projesinin geliştirilmesi, teknik mimarisinin oluşturulması ve küresel futbol analitiği pazarında rekabetçi bir ürün olarak konumlandırılması amacıyla, Sayın Hikmet Pınarbaş'ın vizyonu ve sağlanan araştırma materyalleri ışığında hazırlanmıştır. Rapor, futbolun kaotik ve doğrusal olmayan doğasını, modern bilgisayarlı görü (Computer Vision), makine öğrenimi (Machine Learning) ve veri bilimi disiplinleri ile sentezleyerek, ham video görüntülerini eyleme dönüştürülebilir taktiksel zekaya (Tactical Intelligence) eviren bir sistemin yol haritasını sunmaktadır.

Futbol endüstrisi, sübjektif gözlemlere dayalı geleneksel analiz yöntemlerinden, milimetrik hassasiyete sahip veri odaklı karar destek sistemlerine doğru geri döndürülemez bir paradigma değişimi yaşamaktadır.1 Bu dönüşümde, sahadaki 22 oyuncunun, topun ve hakemlerin hareketlerini saniyenin kesirlerinde takip edebilen, bu veriyi fiziksel ve taktiksel metriklere dönüştüren ve sonuçları insan algısına en uygun biçimde görselleştiren sistemler, kulüplerin en değerli varlıkları haline gelmiştir. hp Engine, bu ekosistemde sadece bir "veri toplayıcı" olarak değil, futbolun karmaşık sistemler teorisi içindeki "düzenini" (order within chaos) ortaya çıkaran bir analiz motoru olarak tasarlanmıştır.

Bu raporun temel tezi, başarılı bir futbol analiz sisteminin sadece mühendislik başarısına değil, aynı zamanda derin bir felsefi ve teorik altyapıya dayanması gerektiğidir. Bu bağlamda proje; Leonardo da Vinci'nin "Saper Vedere" (Görmeyi Bilmek) ilkesini görselleştirme stratejisinin merkezine, Christopher Nolan'ın doğrusal olmayan (non-linear) anlatım tekniklerini taktiksel analiz akışına ve Nikola Tesla'nın enerji, frekans ve titreşim üzerine kurulu evrensel anlayışını oyunun ritmini (momentum) modellemeye entegre etmektedir.2 Teknik tarafta ise YOLOv11 mimarisi, ByteTrack izleme algoritmaları, Beklenen Tehdit (xT) modelleri ve FIFA EPTS (Elektronik Performans ve Takip Sistemleri) standartları, sistemin omurgasını oluşturmaktadır.

## 2. Felsefi ve Teorik Çerçeve: Futbolun Doğasını Modellemek

### 2.1. Karmaşık Adaptif Sistemler Olarak Futbol Takımları

Futbol, deterministik bir makine değil, sürekli değişen çevresel kısıtlar altında (rakip, top, alan, skor, yorgunluk) kararlar alan bağımsız aktörlerin oluşturduğu "Karmaşık Adaptif Bir Sistemdir" (Complex Adaptive System - CAS).5 Geleneksel analizler oyunu statik olaylar dizisi (pas, şut, korner) olarak parçalara ayırırken, hp Engine oyunu "beliren davranışlar" (emergent behaviors) bütünü olarak ele alır. Bu sistemde, parçaların toplamı bütünden daha fazlasıdır; bir oyuncunun topsuz alandaki küçük bir hareketi, takımın genel şeklini ve rakibin savunma dengesini kaotik bir zincirleme reaksiyonla (Kelebek Etkisi) değiştirebilir.6

Kaos teorisi perspektifinden bakıldığında, futbol sahasındaki rastgelelik (stochasticity) tam bir düzensizlik değildir. Aksine, takımların hareketleri belirli "Garip Çekiciler" (Strange Attractors) etrafında kümelenir.7 Örneğin, Pep Guardiola'nın takımları topa sahipken belirli bir geometrik düzeni korumaya çalışır; bu düzen, sistemin "kararlı durumunu" (stable state) temsil eder. Top kaybedildiğinde sistem kaotik bir faza (geçiş/transition) girer ve yeniden bir denge durumu (defansif blok) arar. hp Engine, bu faz geçişlerini (Phase Transitions) tespit etmek için entropi tabanlı metrikler kullanmalı ve takımın organizasyon seviyesini sayısal olarak ifade etmelidir.8 Shannon Entropisi, bir takımın pas dağılımının ne kadar öngörülebilir veya kaotik olduğunu ölçmek için kullanılabilir; yüksek entropi rakip savunma için belirsizlik yaratırken, düşük entropi katı ve ezberlenmiş bir oyuna işaret eder.

### 2.2. "Saper Vedere": Da Vinci Tarzı Görselleştirme

Verinin kendisi ham ve soğuktur; onu bilgiye ve bilgeliğe dönüştüren ise sunum biçimidir. hp Engine'in görselleştirme felsefesi, Leonardo da Vinci'nin karmaşık biyolojik ve mekanik sistemleri kağıda dökme yeteneğinden ilham almalıdır.4 Da Vinci, insan anatomisini çizerken sadece dış görünüşü değil, alttaki kas, kemik ve damar yapılarını katmanlar halinde (layers) ve şeffaflık kullanarak betimlemiştir. Benzer şekilde, hp Engine de sahayı bir "anatomik kesit" gibi sunmalıdır:

* **Katmanlı Analiz:** En altta saha geometrisi (Pitch Control alanları), üzerinde oyuncu hareketleri (Yörüngeler), en üstte ise soyut taktiksel katman (Pas bağlantıları, baskı hatları) yer almalıdır.
* **Sfumato Tekniği:** Keskin sınırlar yerine, olasılık bulutları (probability clouds) kullanılmalıdır. Bir oyuncunun pas atabileceği alan, kesin bir çizgiyle değil, merkezden dışa doğru azalan bir renk yoğunluğuyla (sfumato) gösterilmelidir. Bu, verideki belirsizliği (uncertainty) ve oyunun olasılıklı doğasını dürüstçe yansıtır.9
* **Detay ve Bütünlük:** Da Vinci'nin *Vitruvian Man* çiziminde olduğu gibi, insan (oyuncu) ve geometri (saha) arasındaki orantısal ilişki merkeze alınmalıdır.10

### 2.3. Doğrusal Olmayan Anlatım: Christopher Nolan Etkisi

Bir futbol maçı kronolojik olarak 0'dan 90. dakikaya aksa da, analitik hikaye asla doğrusal değildir. Bir golün asıl nedeni, gol vuruşundan 5 dakika önce yapılan bir oyuncu değişikliği, 10 dakika önce sağ bekin yaşadığı bir sakatlık veya maçın başında belirlenen yanlış bir eşleşme olabilir. Christopher Nolan'ın *Memento*, *Tenet* ve *Dunkirk* filmlerinde zamanı bükerek, parçalayerek ve yeniden kurgulayarak hikayeyi anlatması gibi, hp Engine de "Taktiksel Hikaye Anlatıcılığı" (Tactical Storytelling) yapmalıdır.3

* **Nedensellik Zincirleri (Causal Chains):** Sistem, kullanıcıya sadece "Dakika 65: Gol" bilgisini vermemelidir. Geriye doğru iz sürerek (Flashback), "Dakika 45: Sağ bek yorgunluk eşiğini aştı -> Dakika 55: Sağ kanattan gelen atak sayısı %40 arttı -> Dakika 65: Gol" şeklinde bir neden-sonuç grafiği (Story Curve) sunmalıdır.12
* **Paralel Kurgu (Parallel Editing):** Nolan'ın *Dunkirk* filminde karada, havada ve denizde geçen farklı zaman dilimlerini paralel kurgulaması gibi, hp Engine de savunma hattının derinliği ile forvet hattının pres şiddetini aynı zaman ekseninde, senkronize bir grafik setinde (Dashboard) sunarak, hattalar arası kopuklukları görünür kılmalıdır.

### 2.4. Evrensel Uyum: Altın Oran ve Fibonacci

Estetik, verimlilik ve doğanın matematiği, Altın Oran ($\phi \approx 1.618$) ve Fibonacci dizisi ile kodlanmıştır. Futbol sahası da bu evrensel yasaların dışında değildir.13

* **Altın Bölge (Golden Zone):** Ceza sahası içinde, gol olma olasılığının (xG) en yüksek olduğu, kale direklerini gören açının ve mesafenin optimize edildiği alan, istatistiksel olarak "Altın Oran" prensiplerine uyan bir geometriye sahiptir.14
* **Arayüz Tasarımı (UI/UX):** Analiz panelleri tasarlanırken, ekranın bölünmesi Altın Oran'a göre yapılmalıdır. Ana odak noktası (Video veya Saha Haritası) ekranın %61.8'ini kaplarken, yan paneller (İstatistikler, Filtreler) %38.2'lik alanda yer almalıdır. İnsan gözü, bu asimetrik dengeyi doğal ve estetik bulur, bu da analistin bilişsel yükünü (cognitive load) azaltır.15
* **Oyuncu Gelişimi ve Fibonacci:** Performans artışının veya düşüşünün (regression) tahmin edilmesinde, Fibonacci geri çekilme seviyeleri (Retracement Levels) deneysel bir metrik olarak kullanılabilir. Bir oyuncunun form grafiğindeki dalgalanmaların, finansal piyasalardaki gibi belirli destek ve direnç noktalarına (örneğin %38.2, %61.8 düzeltmeleri) sadık kalıp kalmadığı analiz edilebilir.17

## 3. Teknik Mimari: Bilgisayarlı Görü Boru Hattı (The Pipeline)

Sistemin "gözleri" olan Bilgisayarlı Görü (Computer Vision) katmanı, sahadaki kaotik piksel yığınını, işlenebilir yapısal veriye dönüştürür. Bu süreç, FIFA'nın EPTS doğruluk standartlarını karşılayacak bir hassasiyetle kurgulanmalıdır.

### 3.1. Aşama 1: Veri Girişi ve Ön İşleme (Ingestion)

Sistemin girdisi video dosyalarıdır. Veri kaynağının kalitesi, çıktı kalitesini doğrudan etkiler.

* **Kaynak Türleri:**
  + **Taktik Kamera (Tactical Feed):** Stadyumun çatısından çekilen, tüm sahayı gören ve sabit açılı görüntüdür. Altın standarttır.1
  + **Yayın Görüntüsü (Broadcast Feed):** Değişken açılar, yakın çekimler (zoom) ve tekrarlar (replay) içerir. İşlenmesi daha zordur ancak daha erişilebilirdir.
* **Kare Hızı ve Çözünürlük:** Küçük nesnelerin (top) tespiti için minimum 1080p, ideal olarak 4K çözünürlük gereklidir. Hız ve ivme hesaplamalarında hatayı azaltmak için 25 FPS'lik yayınlar, yapay zeka tabanlı interpolasyon (Frame Interpolation) teknikleriyle 50 FPS'e yükseltilmelidir.

### 3.2. Aşama 2: Nesne Tespiti (Object Detection) - YOLOv11

Endüstri standardı YOLO (You Only Look Once) mimarisinin en son ve en gelişmiş sürümü olan **YOLOv11**, hp Engine'in algılama motoru olarak seçilmiştir.18

* **Neden YOLOv11?**: YOLOv11, önceki sürümlere (v8, v9, v10) kıyasla daha gelişmiş bir omurga (backbone) yapısına ve C3k2 / C2PSA bloklarına sahiptir. Bu özellikler, modelin daha az parametre ile daha yüksek mAP (mean Average Precision) değerlerine ulaşmasını sağlar. Özellikle "küçük nesne tespiti" (small object detection) konusundaki iyileştirmeler, futbol topunun uzak mesafeden tespiti için kritik öneme sahiptir.19
* **Sınıf Dengesizliği ve Eğitim:** Futbol veri setlerinde "oyuncu" sınıfı binlerce örneğe sahipken, "top" sınıfı çok azdır. Bu dengesizliği (Class Imbalance) aşmak için "Mosaic Augmentation" ve "MixUp" gibi veri çoğaltma teknikleri kullanılmalıdır. Eğitim sırasında, yayın görüntülerindeki kamera hareketlerini simüle eden rastgele döndürme, bulanıklaştırma ve parlaklık değişimleri uygulanmalıdır.1

### 3.3. Aşama 3: İskelet Çıkarımı (Pose Estimation) ve Niyet Okuma

Geleneksel sistemler oyuncuyu bir nokta (centroid) olarak görürken, hp Engine oyuncuyu 17 eklem noktasından oluşan biyomekanik bir iskelet olarak modeller.

* **YOLOv11-Pose:** Bu model, oyuncuların omuz, dirsek, kalça, diz ve ayak bileği noktalarını gerçek zamanlı olarak tespit eder.22
* **Vücut Oryantasyonu (Body Orientation):** İskelet verisi kullanılarak oyuncunun göğüs ve kalça vektörleri hesaplanır. Bu vektörler, oyuncunun nereye baktığını ve hareket niyetini (Intent Inference) ortaya koyar. Örneğin, bir oyuncunun kalça açısı kaleye dönük değilse, o yöne şut atma olasılığı düşüktür. Bu veri, pas kanallarının (Passing Lanes) ve görüş alanının (Field of View) modellenmesinde kullanılır.24

### 3.4. Aşama 4: Çoklu Nesne Takibi (Tracking) - ByteTrack

Tespit edilen nesnelerin (Detection) kareler arasında kimliklerini (ID) koruması gerekir. Futbol, oyuncuların sürekli birbirini perdelediği (occlusion) ve hızlı hareket ettiği bir ortam olduğu için standart takip algoritmaları yetersiz kalabilir.

* **ByteTrack:** Çoğu takip algoritması (SORT, DeepSORT), düşük güven skoruna sahip tespitleri gürültü olarak eler. Ancak futbolda hızlı hareket eden bir oyuncu bulanıklaşabilir (motion blur) ve düşük skor alabilir. ByteTrack, bu düşük skorlu tespitleri de değerlendirerek ("second chance"), kopuk yörüngeleri birleştirir ve kimlik değişimlerini (ID Switch) minimize eder.1
* **Re-Identification (ReID):** Bir oyuncu kamera açısından çıkıp tekrar girdiğinde, sistemin onu tanıması gerekir. Oyuncunun görsel özellikleri (forma rengi histogramı, silüet yapısı), derin öğrenme tabanlı bir "embedding" vektörüne dönüştürülür. ResNet-50 veya Vision Transformer (ViT) tabanlı ReID modelleri, bu vektörleri karşılaştırarak oyuncuyu tekrar tanır. SoccerNet ReID benchmarklarında bu modeller %90 üzeri başarı göstermektedir.27

### 3.5. Aşama 5: Kamera Kalibrasyonu ve Homografi

Video düzlemindeki (x,y) piksel koordinatlarının, gerçek dünya (metre) koordinatlarına dönüştürülmesi, fiziksel analiz için zorunludur.

* **Saha Çizgileri Tespiti:** OpenCV ve Hough Transform veya derin öğrenme tabanlı segmentasyon modelleri ile sahadaki çizgiler ve kesişim noktaları (Keypoints) tespit edilir.28
* **Homografi Matrisi:** Tespit edilen en az 4 nokta çifti (Görüntü Pikselleri <-> Saha Metreleri) kullanılarak bir dönüşüm matrisi hesaplanır. Bu matris, perspektif bozulmasını (Perspective Distortion) giderir ve görüntüyü 2D kuş bakışı (top-down) haritaya izdüşürür. Hareketli kameralar için bu işlem her karede tekrarlanmalıdır.1

## 4. Analitik Motoru: Matematiksel Modelleme (The Brain)

Bu katman, bilgisayarlı görüden gelen ham veriyi, taktiksel içgörüye dönüştüren matematiksel modelleri içerir.

### 4.1. Alan Kontrolü (Pitch Control) ve Voronoi

Sahadaki alanın kime ait olduğunu belirlemek için geometrik ve olasılıksal modeller kullanılır.

* **Voronoi Diyagramları:** Sahayı, her noktanın en yakın oyuncuya ait olduğu bölgelere ayırır. Bu basit model, oyuncuların hızını ve yönünü hesaba katmaz.30
* **Gelişmiş Pitch Control (Spearman Modeli):** Voronoi'nin kısıtlamalarını aşmak için oyuncunun hız vektörünü, reaksiyon süresini ve topun hareketini içeren fizik tabanlı bir model kullanılır. Bu model, sahadaki her noktanın "kontrol edilme olasılığını" (Probability of Control) hesaplar. Örneğin, topa koşan hızlı bir oyuncu, kendisine daha yakın ama duran bir oyuncudan daha geniş bir alanı kontrol edebilir.33
* **Convex Hull (Dışbükey Örtü):** Takımın sahadaki yayılımını (spread) ölçmek için en dıştaki oyuncuların oluşturduğu çokgenin alanı hesaplanır. Bu alanın büyüklüğü ve şekli, takımın kompaktlık (compactness) seviyesini ve savunma disiplinini gösterir.35

### 4.2. Beklenen Tehdit (Expected Threat - xT)

Geleneksel xG (Gol Beklentisi) sadece şutları değerlendirirken, xT modeli topu tehlikesiz bir bölgeden daha tehlikeli bir bölgeye taşıyan (pas veya dripling) her aksiyonu ödüllendirir.

* **Izgara (Grid) Tabanlı Yaklaşım:** Saha $M \times N$ (örneğin 16x12) hücreye bölünür. Her hücrenin golle sonuçlanma olasılığı, geçmiş binlerce maçın verisiyle eğitilerek belirlenir.
* **Geçiş Matrisleri (Transition Matrices):** Topun bir hücreden diğerine geçme (pas veya sürme) olasılıkları hesaplanır. Bir oyuncu topu A hücresinden (düşük tehdit) B hücresine (yüksek tehdit) taşıdığında, yarattığı değer $xT(B) - xT(A)$ olarak hesaplanır. Bu model, asisti yapanı değil, asisti hazırlayanı ("pre-assist") ve oyun kurucuları (Deep-lying Playmaker) öne çıkarır.37

### 4.3. Fiziksel Metrikler ve Veri Yumuşatma

GPS verisi olmadığı durumlarda, video tabanlı hız ve ivme hesaplamaları gürültülü (noisy) olabilir.

* **Gürültü Filtreleme:** Ham konum verileri, ani sıçramalar (jitter) içerebilir. Bu gürültüyü gidermek için **Savitzky-Golay** filtreleri veya **Kalman Filtresi** kullanılmalıdır. Bu filtreler, oyuncunun yörüngesini yumuşatarak (smoothing) daha gerçekçi hız ve ivme profilleri oluşturur.1
* **Hız ve İvme Türevi:** Konumun zamana göre birinci türevi hızı, ikinci türevi ivmeyi verir. Ancak ayrık zamanlı veride (discrete data) bu türevler gürültüyü artırabilir, bu nedenle türev işlemi yumuşatılmış veri üzerinde yapılmalıdır.

### 4.4. Kaos ve Taktiksel Faz Tespiti

Oyunun akışındaki (momentum) değişimleri ve taktiksel fazları (Attack, Defense, Transition) tespit etmek için kural tabanlı ve makine öğrenimi yaklaşımları kullanılır.

* **Otomatik Faz Tespiti:** Topa sahip olma durumu (Possession) ve topun sahadaki konumu baz alınarak oyun; "Organize Hücum", "Defansif Geçiş", "Organize Savunma" ve "Ofansif Geçiş" olmak üzere 4 ana faza ayrılır.41 Álvaro Tato Estepa'nın metodolojisine göre, bu fazlar döngüseldir ve birbirini hazırlar.43
* **Entropi ve Rastgelelik:** Takımın pas ağlarındaki ve pozisyon almasındaki entropi (düzensizlik), oyunun ne kadar kaotik olduğunu gösterir. Yüksek entropi, rakip savunmayı dengesizleştirmek için kullanılan bir strateji olabilir ("Winning with Chaos").8

## 5. Standartlar ve Doğrulama: The Benchmark

Sistemin ürettiği verilerin güvenilirliği ve ticari değeri, uluslararası standartlara uygunluğuna bağlıdır.

### 5.1. FIFA EPTS Doğruluk Standartları

FIFA'nın EPTS (Electronic Performance and Tracking Systems) Kalite Programı, sistemlerin doğruluğunu sertifikalandırır. hp Engine, bu test protokollerini simüle etmelidir.44

* **RMSE (Kök Ortalama Kare Hata):** Sistemin ölçtüğü konum ile referans sistem (VICON optik hareket yakalama) arasındaki farkın karesinin ortalamasının kareköküdür. Profesyonel bir sistemde:
  + **Konum Hatası (Position RMSE):** < 1 metre olmalıdır.
  + **Hız Hatası (Velocity RMSE):** < 0.5 m/s olmalıdır.46
* **Hız Bantları (Velocity Bands):** Hata oranları farklı hız aralıklarında ayrı ayrı raporlanmalıdır:

| **Hız Bandı** | **Hız Aralığı (km/s)** | **Beklenen Doğruluk** |
| --- | --- | --- |
| Yürüme (Walking) | 0 - 7 | Çok Yüksek |
| Koşu (Jogging/Running) | 7 - 15 / 15 - 20 | Yüksek |
| Yüksek Hız (High Speed) | 20 - 25 | Orta - Yüksek |
| Sprint | > 25 | Kritik (En zorlu bölge) |

Özellikle sprint ve ani yön değişimlerinde (Change of Direction) optik sistemlerin hatası artabilir, bu nedenle özel kalibrasyon gereklidir.[47, 48]

### 5.2. SoccerNet Benchmarkları

Sistemin algoritmik başarısı, akademik olarak kabul görmüş SoccerNet veri setleri üzerinde test edilerek kanıtlanmalıdır.

* **Action Spotting:** 12 farklı top aksiyonunun (pas, şut, gol vb.) saniyesi saniyesine tespiti (mAP@1s metriği).21
* **Re-Identification:** Farklı kamera açılarında oyuncu tanıma (Rank-1 Accuracy).27
* **Camera Calibration:** Saha çizgilerinden kamera parametrelerinin çıkarılması (Reprojection Error).40

## 6. Görselleştirme ve Arayüz: The Canvas

Analiz sonuçlarının teknik heyete sunumu, en az analizin kendisi kadar kritiktir. Kullanıcı arayüzü (UI), veriyi hikayeleştirmelidir.

### 6.1. Dashboard Tasarımında Altın Oran

**Streamlit** tabanlı dashboardlar, bilgiyi hiyerarşik ve estetik bir düzende sunmalıdır.

* **Ekran Düzeni (Layout):** Ekran, Altın Oran (1.618) prensibine göre bölünmelidir. Ana panel (örneğin 2D Maç Haritası) ekranın %61.8'ini kaplarken, yan paneller (Filtreler, Oyuncu Listesi, KPI Kartları) %38.2'lik alanda konumlanmalıdır. Bu, insan gözünün doğal tarama akışına uygundur ve bilişsel yükü azaltır.15
* **Tipografi ve Boşluk:** Yazı tipleri ve elementler arası boşluklar (padding/margin) Fibonacci dizisine (8px, 13px, 21px...) göre ayarlanmalıdır.51

### 6.2. Gelişmiş Grafikler (mplsoccer ve Plotly)

Python kütüphaneleri mplsoccer ve Plotly kullanılarak interaktif ve estetik grafikler oluşturulmalıdır.

* **Pizza Grafikleri (Pizza Plots):** Oyuncuların yetenek profillerini (Percentile Rank) göstermek için standart radar grafikler yerine, daha okunaklı ve modern "Pizza Plot"lar kullanılmalıdır. Her dilim (slice), oyuncunun lig ortalamasına göre nerede olduğunu gösterir.52
* **Pas Ağları ve Sonarlar:**
  + **Pas Ağları:** Oyuncular arası bağlantıları (Edges) ve ortalama pozisyonları (Nodes) gösterir. Çizgi kalınlığı pas sıklığını, düğüm büyüklüğü oyuncu etkisini (Centrality) temsil eder.54
  + **Pas Sonarları:** Bir oyuncunun paslarının yönünü ve mesafesini "sonar" şeklinde görselleştirir. Oyuncunun ileriye mi yoksa güvenli (yana/geriye) mi oynadığını bir bakışta gösterir.56

## 7. Uygulama ve Geliştirme Yol Haritası

### 7.1. Teknoloji Yığını (Tech Stack)

| **Katman** | **Teknoloji / Kütüphane** | **Kullanım Amacı** |
| --- | --- | --- |
| **Dil** | **Python 3.10+** | Ana geliştirme dili. Geniş ekosistem desteği. |
| **Görüntü İşleme** | **OpenCV, FFmpeg** | Video okuma, kare manipülasyonu, çizim. |
| **Derin Öğrenme** | **PyTorch, Ultralytics YOLOv11** | Nesne tespiti, Pose estimation, Eğitim. |
| **Takip (Tracking)** | **ByteTrack, BoT-SORT** | Çoklu nesne takibi, kimlik koruma. |
| **Veri İşleme** | **Polars, Pandas, NumPy** | Büyük veri setleri için Polars (hız), genel analiz için Pandas. |
| **Matematik & Fizik** | **SciPy, Shapely** | Voronoi, Convex Hull, optimizasyon, geometri. |
| **Futbol Analitiği** | **Kloppy, Socceraction** | Veri standardizasyonu (SPADL), xT, xG modelleri. |
| **Görselleştirme** | **Mplsoccer, Plotly, Streamlit** | Saha çizimi, interaktif grafikler, Web UI. |

### 7.2. Proje Klasör Yapısı (Best Practices)

Sürdürülebilir bir geliştirme için modüler ve standartlara uygun bir yapı şarttır.1

hp\_engine/  
├── data/  
│ ├── raw/ # Ham video dosyaları  
│ ├── processed/ # İşlenmiş veriler (CSV, Parquet, JSON)  
│ ├── external/ # Dış veri setleri (SoccerNet, Metrica)  
│ └── models/ # Eğitilmiş YOLO (.pt) ve ReID (.pth) modelleri  
├── src/  
│ ├── detection/ # YOLOv11 çıkarım (inference) modülleri  
│ ├── tracking/ # ByteTrack entegrasyonu ve ID yönetimi  
│ ├── calibration/ # Homografi matrisi ve saha dönüşüm kodları  
│ ├── features/ # Fiziksel (hız, mesafe) ve taktiksel (xT, Voronoi) metrikler  
│ ├── visualization/ # Mplsoccer çizim fonksiyonları, video overlay  
│ └── utils/ # Yardımcı araçlar (G/Ç, loglama, yapılandırma)  
├── app/  
│ ├── Home.py # Streamlit ana giriş sayfası  
│ ├── pages/ # Alt sayfalar (Oyuncu\_Analizi.py, Takım\_Analizi.py)  
│ └── assets/ # CSS dosyaları, logolar, fontlar  
├── notebooks/ # Jupyter notebook'lar (Ar-Ge, deneme/yanılma)  
├── config/ # Yapılandırma dosyaları (YAML)  
├── tests/ # Birim ve entegrasyon testleri  
├── requirements.txt # Bağımlılıklar  
└── README.md # Dokümantasyon

### 7.3. Geliştirme Fazları

1. **Faz 1: "Merhaba Futbol" (Temel Tespit):** YOLOv11'in hazır modelleriyle oyuncu ve top tespiti. Statik videolarda denemeler.
2. **Faz 2: Veri Kürasyonu ve Eğitim:** Futbol spesifik veri setleriyle modelin eğitilmesi (Fine-tuning). Sınıf dengesizliği ve küçük nesne tespiti optimizasyonu.
3. **Faz 3: Takip ve Haritalama:** ByteTrack entegrasyonu ve Homografi ile 2D harita oluşturma. Oyuncuların sahaya (minimap) yerleştirilmesi.
4. **Faz 4: Analitik Derinlik:** Hız, mesafe, Voronoi ve xT metriklerinin hesaplanması. Veri yumuşatma filtrelerinin uygulanması.
5. **Faz 5: Ürünleşme ve Arayüz:** Streamlit ile profesyonel dashboard tasarımı. Raporlama modüllerinin eklenmesi.

## 8. Sonuç

hp Engine, futbolun görünmeyen yüzünü görünür kılma yolculuğunda, teknolojiyi sanatla birleştiren bir vizyona sahiptir. Da Vinci'nin analitik bakış açısı, Nolan'ın kurgusal zekası ve Tesla'nın frekans anlayışı, bu projenin ruhunu oluşturur. Doğru teknik mimari, titiz matematiksel modelleme ve insan odaklı tasarım ile bu araştırma, sadece başarılı olmakla kalmayacak, aynı zamanda futbol analitiği standartlarını yeniden tanımlayacak potansiyele sahiptir. Araştırma tamamlanmıştır; şimdi inşa etme zamanıdır.

#### Alıntılanan çalışmalar

1. Futbol Video Analizi İçin Kapsamlı Yol Haritası, <https://drive.google.com/open?id=16LTku-Usl5hYVADT2T8Qyd81in0VYnL4T5GpVaQok8I>
2. If you want to understand the world, consider it in terms of energy, frequency and vibration – Nikola Tesla | Inborn Voice, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.inbornvoice.com/us/News/if-you-want-to-understand-the-world-consider-it-in-terms-of-energy-frequency-and-vibration-nikola-tesla/>
3. A Study of Christopher Nolan's Nonlinear Narratives, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://accd.cname.accesstomemory.org/uploads/r/artcenter-college-of-design-archives/f/6/5/f653b9eb2b4b045ac23ef7fce3bddf3d88410037861689501c6ba5b876b5f275/MTFILM190.1.pdf>
4. Leonardo da Vinci's Fluid Dynamics - Resolved Analytics, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.resolvedanalytics.com/the-greats-of-fluid-dynamics/leonardo-da-vinci-fluid-dynamics>
5. Sports teams as complex adaptive systems: manipulating player numbers shapes behaviours during football small, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://shura.shu.ac.uk/12547/1/Davids%20sports%20teams%20as%20complex.pdf>
6. Chaos Theory in Sports Betting - Predicting the Unpredictable - Best Gambling Sites 2026, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.gamblingsite.com/blog/chaos-theory-in-sports-betting/>
7. Visualizing the attraction of strange attractors - ResearchGate, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/228695600_Visualizing_the_attraction_of_strange_attractors>
8. Winning With Chaos in Association Football: Spatiotemporal Event Distribution Randomness Metric for Team Performance Evaluation - Aston Publications Explorer, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/46482/1/Winning_With_Chaos_in_Association_Football_Spatiotemporal_Event_Distribution_Randomness_Metric_for_Team_Performance_Evaluation.pdf>
9. Let Leonardo da Vinci Inspire Your Next Data Presentation - SAS Support, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings19/3410-2019.pdf>
10. Vitruvian Man - Wikipedia, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://en.wikipedia.org/wiki/Vitruvian_Man>
11. Visualizing Nonlinear Narratives with Story Curves, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://storycurve.namwkim.org/file/paper.pdf>
12. (PDF) The Impact of Christopher Nolan's Non-linear Narrative Structure on the Audience's Acceptance - ResearchGate, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/393152044_The_Impact_of_Christopher_Nolan's_Non-linear_Narrative_Structure_on_the_Audience's_Acceptance>
13. The Golden Ratio in Sports by Rosie Olivero on Prezi, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://prezi.com/p/gae3thf9lhmo/the-golden-ratio-in-sports/>
14. Golden Zone – Football Tactics Explained, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://the-footballanalyst.com/golden-zone-football-tactics-explained/>
15. Golden Ratio in Design: Everything You Need to Know (With Examples & Tips) - Mockplus, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.mockplus.com/blog/post/the-golden-ratio-in-design>
16. Using the golden ratio in UX design - LogRocket Blog, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://blog.logrocket.com/ux-design/using-the-golden-ratio-in-ux-design/>
17. Predicting Bounce Back and Regression Using Fibonacci Levels (Fantasy Football), erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.thefantasyfootballers.com/analysis/predicting-bounce-back-and-regression-using-fibonacci-levels-fantasy-football/>
18. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements - arXiv, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://arxiv.org/html/2410.17725v1>
19. YOLOv8 vs YOLO11: Evolution of Real-Time Object Detection - Ultralytics YOLO Docs, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://docs.ultralytics.com/compare/yolov8-vs-yolo11/>
20. Comparing Ultralytics YOLO11 vs previous YOLO models, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.ultralytics.com/blog/comparing-ultralytics-yolo11-vs-previous-yolo-models>
21. My Adventure With Team Ball Action Spotting Task at SoccerNet Challenge 2025 - Int8, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://int8.io/team-ball-action-spotting-challenge-2025>
22. Ultralytics YOLO11: Enabling Smart Fitness Technology, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.ultralytics.com/blog/smart-fitness-technology-enabled-by-ultralytics-yolo11>
23. YOLO11 Pose Estimation: Guide | Ultralytics, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.ultralytics.com/blog/how-to-use-ultralytics-yolo11-for-pose-estimation>
24. Futbol Analizi: Her Şeyin Teorisi, <https://drive.google.com/open?id=186noab_ojkSZYe4P8qoVYcamSxH4w3iY0kQ4-m_JDIs>
25. USING POSE ESTIMATION TO IDENTIFY GOALKEEPER MOVEMENT TIMING - Scholar Works at UT Tyler, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://scholarworks.uttyler.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1033&context=hkdept_grad>
26. Futbol Video Analizi İçin Kapsamlı Yol Haritası, <https://drive.google.com/open?id=1DJVbXQyFbPWlwQVaE3KkMzoZKopgCc3oAyXUYen0CD4>
27. SoccerNet/sn-reid: Repository containing all necessary codes to get started on the SoccerNet Re-Identification challenge. This repository also contains benchmark methods. - GitHub, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://github.com/SoccerNet/sn-reid>
28. Camera Calibration in Sports with Keypoints - Roboflow Blog, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://blog.roboflow.com/camera-calibration-sports-computer-vision/>
29. WorldPose: A World Cup Dataset for Global 3D Human Pose Estimation - arXiv, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://arxiv.org/html/2501.02771v1>
30. football-crunching/notebooks/using voronoi diagrams.ipynb at master - GitHub, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://github.com/rjtavares/football-crunching/blob/master/notebooks/using%20voronoi%20diagrams.ipynb>
31. From Optical Tracking to Tactical Performance via Voronoi Diagrams: Team Formation and Players' Roles Constrain Interpersonal Linkages in High-Level Football - PMC - PubMed Central, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9824483/>
32. Quantifying Pitch Control in Soccer - Math projects, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://math-projects.elte.hu/media/works/388/report/Project-Work-Balazs_pACbvVD.pdf>
33. football-Analytics/Building Pitch Control.ipynb at main - GitHub, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://github.com/TuringNPcomplete/football-Analytics/blob/main/Building%20Pitch%20Control.ipynb>
34. Pitch Control in Football - Utrecht University Student Theses Repository Home, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://studenttheses.uu.nl/bitstream/handle/20.500.12932/47138/Thesis_anoniem.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
35. Convex Hulls for Football in Python, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://fcpython.com/visualisation/convex-hulls-football-python>
36. Breaking Down Football Passes: Space, Distance, and Tactical Insights with Python, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://blog.gopenai.com/breaking-down-football-passes-space-distance-and-tactical-insights-with-python-19940f9ebde6>
37. Calculating Expected Threat in Python Using Linear Algebra - PenaltyBlog, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://pena.lt/y/2025/01/08/calculating-expected-threat-in-python-using-linear-algebra/>
38. How to Calculate and Plot Football Match Momentum Using Event Data? | by Aleks Kapich, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://medium.com/@aleks-kapich/how-to-calculate-and-plot-football-match-momentum-using-event-data-1ca3a9ac4a39>
39. Expected Threat (xT) - socceraction 1.5.3 documentation - Read the Docs, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://socceraction.readthedocs.io/en/latest/documentation/valuing_actions/xT.html>
40. Camera Calibration - SoccerNet, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.soccer-net.org/tasks/camera-calibration>
41. Phases of Play – an Introduction - Stats Perform, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.statsperform.com/resource/phases-of-play-an-introduction/>
42. Navigating team tactical analysis in football: An analytical pipeline leveraging player tracking technology - LJMU Research Online, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/27404/1/Navigating%20Team%20Tactical%20Analysis%20in%20Football%20An%20Analytical%20Pipeline%20Leveraging%20Player%20Tracking%20Technology.pdf>
43. PROPUESTA de metodología.pdf, <https://drive.google.com/open?id=1YqmMJ8xZ_s0j9KZZkaM0eGL-MEx8MtXb>
44. EPTS Testing Process - Inside FIFA, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://inside.fifa.com/innovation/standards/epts/epts-testing-process>
45. Broadcast EPTS Test Manual November 2024 - v2.0 - FINAL | PDF | Camera - Scribd, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.scribd.com/document/808959313/Broadcast-EPTS-Test-Manual-November-2024-v2-0-FINAL>
46. Comparison of a computer vision system against three‐dimensional motion capture for tracking football movements in a stadium environment, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://d-nb.info/1256665347/34>
47. (PDF) SoccerNet 2025 Challenges Results - ResearchGate, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/394978601_SoccerNet_2025_Challenges_Results>
48. How to use the Golden Ratio in web design | Schifino Lee, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://schifinolee.com/how-to-use-the-golden-ratio-in-web-design/>
49. Golden Ratio in UI Design. How Can You Make Your Web Apps… | by Steve - Medium, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://medium.com/@steve_28162/golden-ratio-in-ui-design-a1e8722b6866>
50. Radar Charts — mplsoccer 1.6.1 documentation, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://mplsoccer.readthedocs.io/en/latest/gallery/radar/plot_radar.html>
51. Exploring mplsoccer - Advanced Player Analysis | PITCH IQ, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://steveaq.github.io/Advanced-Player-Radars/>
52. Football and Geometry - Passing Networks - Towards Data Science, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://towardsdatascience.com/football-and-geometry-passing-networks-6e201ceff6ef/>
53. Passing networks — Soccermatics documentation - Read the Docs, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://soccermatics.readthedocs.io/en/latest/gallery/lesson1/plot_PassNetworks.html>
54. Passing Sonars Football Viz in Python: Full Walkthrough | by Aleks Kapich - Medium, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://medium.com/@aleks-kapich/passing-sonars-football-viz-in-python-full-walkthrough-b2f2e46720c1>
55. Libro. Metodología Del Fútbol Común. Álvaro Tato Estepa | PDF - Scribd, erişim tarihi Ocak 5, 2026, <https://www.scribd.com/document/808371190/Libro-Metodologia-Del-Futbol-Comun-Alvaro-Tato-Estepa>