

ETKİLEŞİMLİ BİR KAM MEKANİZMASI SİMÜLASYONU İLE TAKİPÇİ HAREKETİNİN GÖRSELLEŞTİRİLMESİ

Samet YAVUZ^{1, a)}

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, İzmir Havacılık MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü 35920, İZMİR

^{a)}syavuz@thk.edu.tr

Bu çalışmada, kam mekanizmalarının temel hareket prensiplerini ve takipçi davranışını görselleştirmeye yönelik etkileşimli bir simülasyon geliştirilmiştir. Mathematica yazılımı kullanılarak oluşturulan simülasyon, farklı kam profilleri (sinüsoidal, harmonik, parabolik, üçgen, trapezoidal, sikloidal ve polinomsal) için takipçinin konum, hız ve ivme değerlerinin açıya bağlı olarak nasıl değiştiğini gerçek zamanlı olarak sunmaktadır. Simülasyon, mekanizma teorisi ve makine elemanları gibi derslerde öğrencilerin takipçi hareketlerini sezgisel olarak anlamalarını kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Modelde sürtünme, yay etkisi ve kuvvet etkileşimleri gibi karmaşık fiziksel etkenler dışarıda bırakılmış; bunun yerine, saf geometrik temas ilişkisine dayalı bir görselleştirme hedeflenmiştir. Çalışma, hem eğitimde kullanılacak açık uçlu bir öğrenme aracı sunmakta, hem de kam-takipçi sistemlerinin temel prensiplerinin görsel ve gerçek zamanlı bir biçimde incelenmesine olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kam Mekanizması, takipçi hareketi, Mathematica, etkileşimli simülasyon, görselleştirme, mühendislik eğitimi

VISUALIZATION OF FOLLOWER MOTION USING AN INTERACTIVE CAM MECHANISM SIMULATION

ABSTRACT

In this study, an interactive simulation has been developed to visualize the fundamental motion principles of cam mechanisms and follower behavior. Using the Mathematica software, the simulation dynamically presents how the position, velocity, and acceleration of the follower change with respect to the cam angle for various cam profiles (sinusoidal, harmonic, parabolic, triangular, trapezoidal, cycloidal, and polynomial). The simulation is designed to support intuitive understanding of follower motion, particularly in courses such as mechanism theory and machine elements. Complex physical effects such as friction, spring forces, and mass interactions have been deliberately excluded, focusing instead on a pure geometric contact-based visualization. This study offers an open-ended learning tool that can be used in education and enables the visual and real time exploration of the basic principles of cam-follower systems.

Keywords: Cam Mechanism, follower motion, Mathematica, interactive simulation, visualization, engineering education

1. GİRİŞ

Kam-takipçi mekanizmaları, döner hareketin belirli bir düzende doğrusal ya da salınımlı harekete dönüştürülmesini sağlayan temel mekanik sistemlerden birisidir [1]. Bu mekanizmalar; tekstil makineleri, otomobil motorları, otomatik ambalaj sistemleri gibi birçok endüstriyel uygulamada geniş bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Mekanik enerji

iletiminin hassas kontrolünü mümkün kılmaları, onları sadece endüstride değil, aynı zamanda mühendislik eğitiminin de vazgeçilmez bir konusu hâline getirmiştir. Öğrencilere bu mekanizmaların işleyişini kavratmak, mekanizma tasarımı ve analizinde temel bir basamak teşkil etmektedir.

Mekanik sistemlerin kavranması sürecinde, genellikle soyut kavramlar anlaşılması zor

konular olarak görülebilmektedir. Özellikle zamanla değişen pozisyon, hız ve ivme gibi parametrelerin görselleştirilmesi, öğrenciler için kavramsal anlamayı derinleştirici bir rol oynamaktadır. Etkileşimli görselleştirmeler; öğrencilere sadece statik şemalar üzerinden değil, sistemin zamanla evrimini gözlemleyerek öğrenme fırsatı sunar [3]. Lis, mühendislik öğrencilerinin kavramsal bilgileri daha iyi anlamaları için görselleştirme araçlarının etkili bir şekilde kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır [2]. Görselleştirmenin, özellikle soyut mekanik sistemlerin anlaşılmasında öğrencinin zihinsel modeliyle uyumlu temsiller sunduğunu ve öğrenme motivasyonunu artırdığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Mavinkurve ve Murthy tarafından yürütülen bir çalışmada, etkileşimli görselleştirme araçlarının mühendislik tasarımı sürecindeki düşünme yeteneklerini geliştirmeye katkı sunduğu ortaya konmuştur [7]. Öğrencilerin açık uçlu problemleri çözme, alternatif çözümler üretme ve görsel temsilleri kullanarak karar verme becerilerinin geliştiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, Sorby vd. mühendislik eğitiminde görselleştirme becerilerinin geliştirilmesinin yalnızca kavramsal anlayışı değil, aynı zamanda öğrencinin mühendislik alanındaki genel başarısını da artırdığını belirtmiştir [8]. Özellikle mekansal düşünme yeteneklerinin desteklenmesinin, mekanik sistemlerin modellenmesinde ve tasarımında önemli bir rol oynadığı ifade edilmektedir. Günümüzde web tabanlı etkileşimli uygulamaların yaygınlaşmasıyla birlikte, öğretim materyallerinin bu doğrultuda dönüştürülmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Örneğin, Greim vd. tarafından yayımlanan bir çalışmada, web tabanlı görselleştirme uygulamalarının öğrencinin materyalle aktif etkileşimini teşvik ederek öğrenmeyi kalıcı hale getirdiği rapor edilmiştir [9]. Son olarak, makine mühendisliği özelinde yapılan bir uygulamada, derslerde kullanılan görselleştirme tabanlı öğretim yöntemlerinin öğrencilerin konuları içselleştirme düzeylerini artırdığı ve soyut kavramların somutlaştırılmasında etkili olduğu ortaya konmuştur [10]. Bu bağlamda geliştirilen simülasyonlar, öğrencilerin deneyimleyerek öğrenmelerine olanak tanıırken aynı zamanda analitik düşünme ve yorumlama becerilerini de desteklemektedir.

Kam mekanizmalarının modellenmesi ve simülasyonu üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar, özellikle mühendislik eğitimi bağlamında dikkat çekmektedir. Bu çalışmalarda genellikle MATLAB, Simulink, GeoGebra veya Mathematica gibi araçlar kullanılarak hareketin animasyonu ve temel kinematik büyüklüklerin grafiksel gösterimi sağlanmaktadır [4, 5, 6]. Zwiers, düzlemsel kam mekanizmalarının simülasyonunda çeşitli matematiksel tekniklerin uygulanmasını göstermiştir [11]. Geliştirilen model, mekanik mühendisliği ve mekatronik öğrencileri için uygulamalı bir bileşen olarak hizmet etmektedir. Bu çalışma, temel cebir, doğrusal olmayan denklem sistemleri için yinelemeli algoritmalar, koordinat dönüşümleri, enterpolasyon teknikleri, sayısal entegrasyon ve diferansiyasyon yöntemleri gibi konuları kapsamaktadır. Bu çalışmada çoklu kam profili seçimi ve hareketin anlık pozisyon, hız ve ivme değerleriyle senkronize olarak görselleştirilmesi Mathematica ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Peron vd. tarafından Otto motorunun valf mekanizmasının dinamik simülasyonu gerçekleştirilmiştir [12]. Bu model, kam dönüşü aracılığıyla kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin belirlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, valf yayındaki kuvvetler ve kamdaki tork gibi parametrelerin zamanla değişimi analiz edilmiştir. Ranjan, Comsol Blog web sayfasında kam-takipçi mekanizmalarının modellenmesi üzerine bir rehber sunmuştur [13]. COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak, sabit kam ve hareketli takipçi gibi çeşitli konfigürasyonlar modellenmiştir. Bu yaklaşım, mühendislik uygulamalarında bu tür mekanizmaların simülasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, kam mekanizmalarının davranışını farklı kam profili türleri için gerçek zamanlı olarak modelleyen ve takipçi hareketinin konum, hız ve ivme değişimlerini eş zamanlı olarak sunan bir Mathematica simülasyonu geliştirmektir. Simülasyon, öğrencilere kam profili-geometri ilişkisini deneyimleme fırsatı sunarken; eğitimcilere ise soyut kavramları somutlaştırma açısından güçlü bir araç sağlamaktadır. Ayrıca geliştirilen yapı, ileri düzeyde takipçi türleri, yay kuvvetleri ya da temas kuvveti analizleri gibi modüllerin de eklenmesine imkân tanıyacak biçimde genişletilebilir olarak

tasarlanmıştır. Böylece hem temel eğitim hem de ileri düzey mekanizma analizi çalışmalarında kullanılabilir esnek bir platform sunulmuştur.

2. KAM-TAKİPÇİ MEKANİZMALARI

Kam mekanizmaları, döner bir eleman (kam) ile ona temas eden bir diğer elemanın (takipçi) etkileşimi yoluyla belirli bir hareketin elde edilmesini sağlayan sistemlerdir. Bu mekanizmalar; karmaşık, doğrusal olmayan hareketlerin sade döner hareketlerle üretilebilmesi sayesinde endüstride ve mekanizma teorisinde önemli bir yere sahiptir. Kam yüzeyinin şekli, sistemin tüm hareket karakteristiğini belirlerken; takipçinin türü ve bağlantı biçimi, bu hareketin sistemden nasıl "alındığını" belirler. Dolayısıyla kam-takipçi mekanizmalarının kuramsal analizi, yalnızca kam profilinin geometrik tanımıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda farklı takipçi türlerinin davranışlarının ve sistemde oluşan konum, hız ve ivme eğrilerinin anlaşılmasını da içermektedir.

Kam mekanizmalarında, takipçinin hareketi kam profiline bağlı olarak belirlenir. Bu hareket, genellikle bir çevrimsel dönüş (0–360°) boyunca kamın açılma pozisyonuna göre tanımlanır. Takipçinin konumu, hızı ve ivmesi, bu açılma pozisyonuna göre tanımlanan yer değiştirme fonksiyonunun zamana göre birinci ve ikinci türevleriyle elde edilir. Konum takipçinin düşey doğrultudaki yer değiştirmesini tanımlar. Kam profiline bağlı olarak fonksiyonel bir biçimde tanımlanır. Hız ise zamana göre konum fonksiyonunun türevi alınarak elde edilir. İvme de takipçi konumunun ikinci türevinden elde edilir. Bu değer, sistemde oluşabilecek dinamik zorlamaların tespiti açısından önemlidir.

Bu çalışmada, kam profili üzerindeki farklı hareket fonksiyonları (sinüsoidal, harmonik, parabolik, sikloidal vb.) kullanılarak takipçi hareketi modellenmiştir. Bu fonksiyonlar, takipçinin yumuşak geçişli ve titreşimsiz hareket etmesini sağlamak amacıyla endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Mathematica ortamında bu fonksiyonların türevleri analitik olarak alınarak hız ve ivme ifadeleri de otomatik olarak elde edilmiştir.

Simülasyonda sürtünme, yay kuvveti, takipçi kütlesi gibi etkiler hesaba katılmamıştır. Bunun temel gerekçeleri olarak eğitsel amaçla

tasarlanmış olması, karmaşıklığın düşük seviyede tutulmak istenmesi ve görsel benzetim ortamının öncelik oluşturması sayılabilir. Yine yay sabiti, sönüm oranı veya kütle gibi parametrelerin dahil edilmesi sistemin diferansiyel denklemlerle modellenmesini gerektirecektir. Bu durum, gerçek zamanlı etkileşime dayalı bir simülasyonun hem hesap yükünü artırmakta hem de kullanıcı deneyimini karmaşıktır. Ayrıca kullanıcının takipçi hareketini değişen kam geometrisine ve takipçi türüne göre gözlemlemesi yeterli görülmemiş, dinamik etkiler arka planda bırakılmıştır. Böylece, sistemin temel çalışma prensibi açıkça anlaşılabilir hale getirilmiştir.

2.1. Kam Profili Tanımı ve Çeşitleri

Kam profili, döner kam elemanının dış yüzeyinin şeklidir ve takipçiye hangi anda ne kadar hareket iletileceğini belirler. Profilin geometrisi, takipçinin zaman içindeki konum, hız ve ivme davranışını doğrudan etkiler. Bir kam mekanizmasının istenen hareketi doğru şekilde verebilmesi, uygun profil seçimine bağlıdır.

Bu çalışmada, çeşitli hareket gereksinimlerini karşılamak üzere literatürde yaygın olarak kullanılan yedi farklı kam profiline yer verilmiştir: sinüsoidal, harmonik, üçgensel (triangular), parabolik, trapezoidal, sikloidal (cycloidal) ve 3. dereceden polinomsal (polynomial3) profiller.

Sinüsoidal profil, takipçinin hareketini düzgün ve sürekli değişen bir hızla sağlar. Özellikle yumuşak ivme geçişleri istenen uygulamalarda tercih edilir.

Harmonik profil, sinüsoidal ile benzer bir yapıda olup, hızın sıfırdan başlayıp sıfıra dönmesini sağlar ve genellikle titreşim azaltımı amacıyla kullanılır.

Üçgensel (Triangular) profil, keskin hız değişimlerinin olduğu, daha ani hareket gerektiren uygulamalarda görülür.

Parabolik profil, simetrik hız geçişlerine sahiptir ve düzgün ivme geçişleri sağlar.

Trapezoidal profil, sabit hızlı (uniform motion) bölgeler içeren yapısıyla endüstride sıkça kullanılır. Başlangıç ve bitişte hız artışı/azalışı ile birlikte ortada sabit hız bölgesi içerir.

Sikloidal profil, tekerlekli sistemlerde olduğu gibi, yumuşak ivme geçişleri ve titreşimi azaltıcı yapısıyla öne çıkar.

3. dereceden polinomsal profil, düşük dereceli polinomlar yardımıyla hareket fonksiyonunun matematiksel olarak kolaylıkla ifade edilmesini sağlar ve kontrol edilebilirliği yüksektir.

Simülasyonda bu yedi profilin her biri kullanıcı tarafından seçilerek görsel ve sayısal analiz yapılabilen, böylece her profilin takipçiye nasıl bir hareket aktardığı doğrudan gözlemlenebilmektedir.

2.2. Takipçi Türleri

Kam mekanizmalarında takipçi (izleyici), kam profiline temas ederek istenen çıkış hareketini elde eden elemandır. Takipçinin geometrisi ve hareket doğrultusu, mekanizmanın genel davranışını doğrudan etkiler. Kullanım amacına ve sistem gereksinimlerine bağlı olarak farklı takipçi türleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada yalnızca simülasyonda yer verilen türler incelenmiş ve takipçi hareketinin mekanizma üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Bu bağlamda ele alınan başlıca takipçi türleri doğrusal ve salınım takipçilerdir. Doğrusal yalnızca doğrusal bir doğrultuda yukarı-aşağı hareket eder. En basit ve en yaygın kam mekanizması türlerinden biridir. Simülasyonda da temel çıkış hareketi bu tür doğrusal takipçi ile modellenmiştir. Düz takipçilere ait farklı uç tipleri incelemeye dahil edilmemiştir. Örneğin rulolu (roller) takipçide, takipçinin kam yüzeyine temas eden ucu bir döner silindirden oluşur. Rulo sayesinde sürtünme kuvveti önemli ölçüde azaltılır ve takipçinin daha yumuşak hareket etmesi sağlanır. Simülasyonda yer alan takipçi modellenmesinde, sürtünme göz ardı edildiği için bu türün avantajları görsel olarak sınırlı da olsa hissedilmektedir. Döner takipçi ise bir mafsal etrafında dönerek kam profiline temas eder. Genellikle dar alanlarda veya dönel hareket gerektiren sistemlerde kullanılır. Çalışmada görselleştirilen ve kullanıcı etkileşimiyle değiştirilebilen takipçi türleri, özellikle düz uçlu doğrusal takipçi ve rulolu doğrusal takipçi ile sınırlı bırakılmıştır, böylece mekanizmanın tepkisinin daha sade bir şekilde gözlemlenmesine olanak tanınmaktadır.

3. SİMÜLASYON ORTAMININ OLUŞTURULMASI

Simülasyon ortamında profilin şekli, takipçi tipi, takipçinin yer değiştirme fonksiyonu kullanıcı tarafından gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilir hale getirilmiştir (Şekil 1).

Simülasyonun geliştirilme süreci üç temel yapı etrafında organize edilmiştir: kullanılan yazılım ortamının belirlenmesi ve gereçlendirilmesi; kodun işlevsel yapısının açıklanması; ve son olarak kullanıcıya sunulan etkileşimli kontrol parametrelerinin tanımlanması. Aşağıda bu üç bileşen sırasıyla ele alınmaktadır.

Simülasyonun geliştirilmesi için Wolfram Mathematica yazılımı tercih edilmiştir. Mathematica, sembolik ve sayısal hesaplamaları entegre bir şekilde yürütebilmesi, dinamik (gerçek zamanlı) görselleştirme olanakları sunması ve kullanıcı etkileşimine açık ara yüzler oluşturabilmesi gibi özellikleriyle mekanizma teorisi temelli görsel simülasyon projeleri için uygun bir ortam sunmaktadır. Özellikle Manipulate komutu ile değişkenlerin kullanıcı tarafından anlık olarak ayarlanabilmesi, kam profilinin ve buna bağlı olarak izleyicinin hareket grafiğinin eş zamanlı olarak güncellenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca grafiksel gösterimlerin estetik açıdan düzenlenmesi, animasyon oluşturulması ve parametrik fonksiyonların kolaylıkla tanımlanması gibi avantajlar da Mathematica'yı tercih sebebi yapmıştır. Mathematica'nın bir başka önemli avantajı ise, yüksek seviyede matematiksel gösterim gücü sayesinde, hareket denklemlerinin doğrudan sembolik olarak ifade edilip analiz edilebilmesidir. Bu yönüyle hem akademik sunumlara hem de eğitim materyallerine dönüştürülmeye uygun bir yapı sağlamaktadır.

3.1. Simülasyon Ortamının Genel Yapısı: Profil Üretimi, Animasyon, Grafik Gösterim

Geliştirilen simülasyon kodu, üç temel bileşen üzerine yapılandırılmıştır: (1) kam profili üretimi, (2) kam-takipçi etkileşim animasyonu ve (3) hareket grafiğinin gösterimi. Bu üç yapı, kullanıcı etkileşimiyle entegre biçimde çalışacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 1).

İlk olarak, seçilen kam profiline (sinüsoidal, harmonik, üçgensel, parabolik, trapezoidal,

sikloidal, üçüncü dereceden polinom) göre, takipçi yer değiştirme fonksiyonu tanımlanmaktadır. Bu fonksiyon, profilin 0–360° dönme aralığı için sürekli bir şekilde hesaplanmaktadır. İkinci bileşen olan animasyon kısmında, kam profili ile doğrusal hareketli bir takipçi arasındaki fiziksel etkileşim görsel olarak sunulmaktadır. Kam dönme açısı arttıkça, takipçinin yukarı-aşağı hareketi eşzamanlı olarak güncellenmektedir. Bu etkileşim sırasında kam ve takipçi grafiksel olarak ayrı renklerle ve gerçek zamanlı pozisyonlarıyla çizdirilmektedir. Üçüncü bileşende ise, kam dönme açısına bağlı olarak takipçi yer değiştirme değerlerinin grafiksel gösterimi yapılmaktadır. Bu grafik, kullanıcının ayarladığı parametrelere bağlı olarak anlık olarak güncellenmektedir. Böylece farklı profil türlerinin dinamik özellikleri kullanıcı tarafından doğrudan gözlemlenebilmektedir.

3.2. Kullanıcı Etkileşimi ve Kontrol Parametreleri

Geliştirilen Mathematica simülasyonu, kullanıcıya kam-takipçi sistemine dair çeşitli parametreleri gerçek zamanlı olarak değiştirme ve sonuçlarını gözleme imkânı sunmaktadır. Bu etkileşim, simülasyonun eğitsel ve deneysel değerini artırmaktadır. Kullanıcının kontrol edebildiği başlıca parametreler şunlardır:

Kam Profili Türü: Yedi farklı hareket profili (sinüzoidal, harmonik, üçgensel, parabolik, trapezoidal, sikloidal, üçüncü dereceden polinom) arasından seçim yapılabilir (Şekil 2). Her bir profil, farklı dinamik özellikler üretmekte ve takipçi davranışını belirgin şekilde etkilemektedir.

Takipçi Türü: Kullanıcı doğrusal ya da salınımlı takipçi seçeneklerinden birisini seçerek farklı kam profili türlerine karşın

yaptığı hareketi gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir (Şekil 3).

Genlik: Takipçinin yer değiştirme miktarını kontrol eder. Bu değer, kam profilinin maksimum yüksekliğini belirleyerek animasyonun ölçeğini etkiler (Şekil 4).

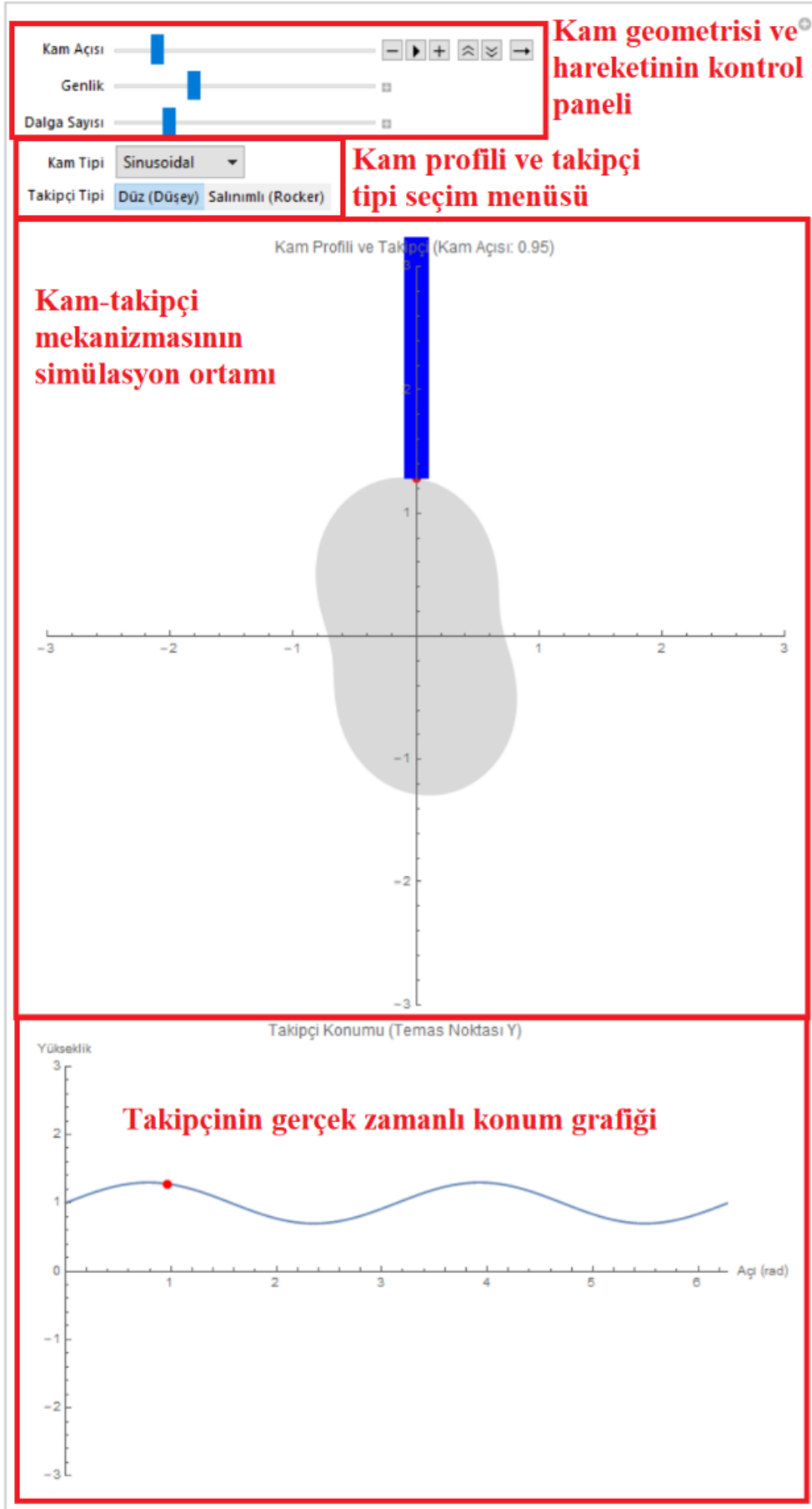
Dalga Sayısı: Belirtilen açısal aralık içerisinde kaç adet çıkış iniş döngüsü olacağını belirler (Şekil 5). Bu, özellikle çok loblu kamların modellenmesinde önemlidir.

Açısal Konum (θ): Kamın anlık dönme açısını kontrol eder (Şekil 6). Bu parametre, animasyonu manuel olarak ileri-geri almak veya belirli açılardaki sistem davranışını incelemek için kullanılabilir.

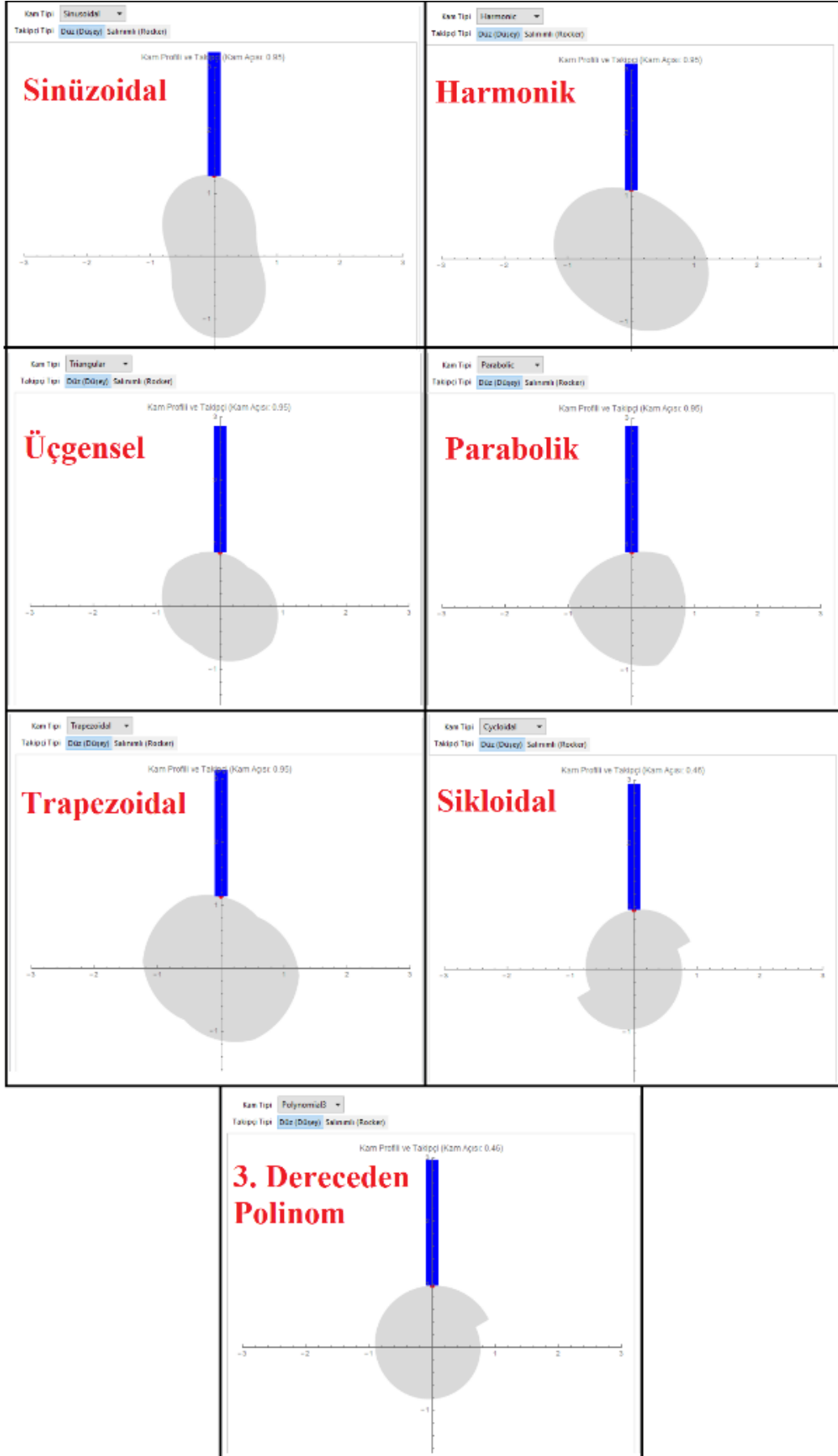
Bu parametrelerin tümü, Manipulate yapısı ile entegre edilmiştir. Herhangi bir parametrede yapılan değişiklik, eşzamanlı olarak hem animasyon hem de grafik gösterimlerinde güncellenmektedir. Bu sayede kullanıcı, farklı tasarım senaryolarının kam-takipçi sistemine olan etkilerini doğrudan gözlemleyebilmekte, hareket fonksiyonlarının görsel ve sayısal etkilerini keşfedebilmektedir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

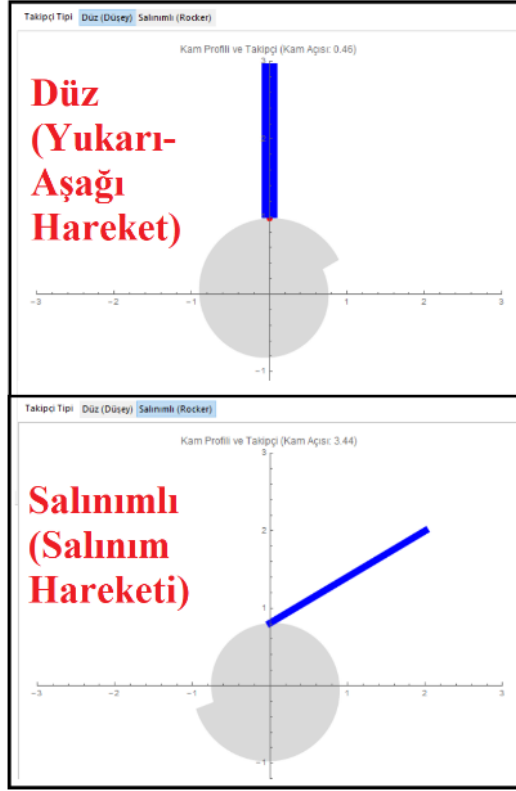
Geliştirilen Mathematica simülasyonu, kam-takipçi mekanizmalarının dinamik davranışlarını sezgisel ve etkileşimli bir biçimde görselleştirme imkânı sunmaktadır. Bu özellik, özellikle mühendislik eğitiminde, soyut kinematik kavramların somutlaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel ders anlatımında, takipçi konumunun, hızının ve ivmesinin açısal konumla ilişkisi genellikle matematiksel ifadelerle aktarılırken, bu simülasyon sayesinde öğrenciler, teorik ifadelerin sistem davranışına nasıl yansıtıldığını doğrudan gözlemleyebilmektedir.



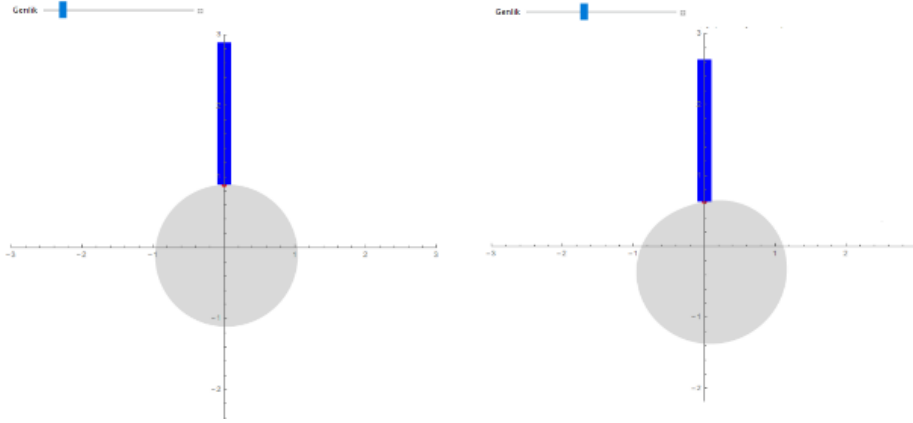
Şekil 1. Simülasyon ortamının genel yapısı



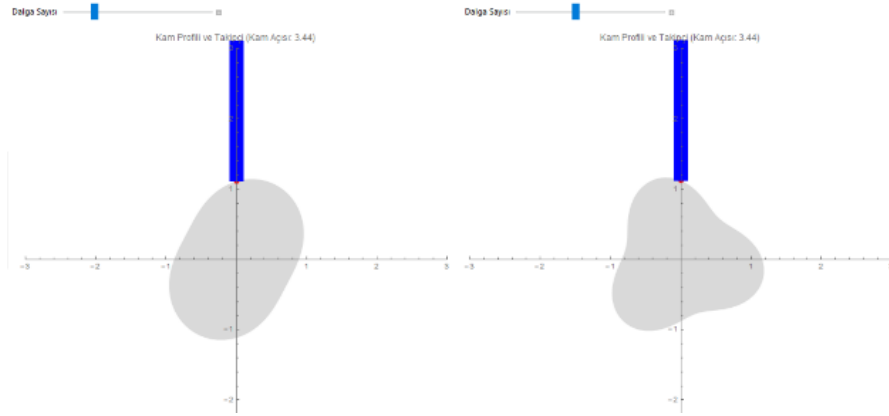
Şekil 2. Simülasyonda kullanılan farklı kam profilleri



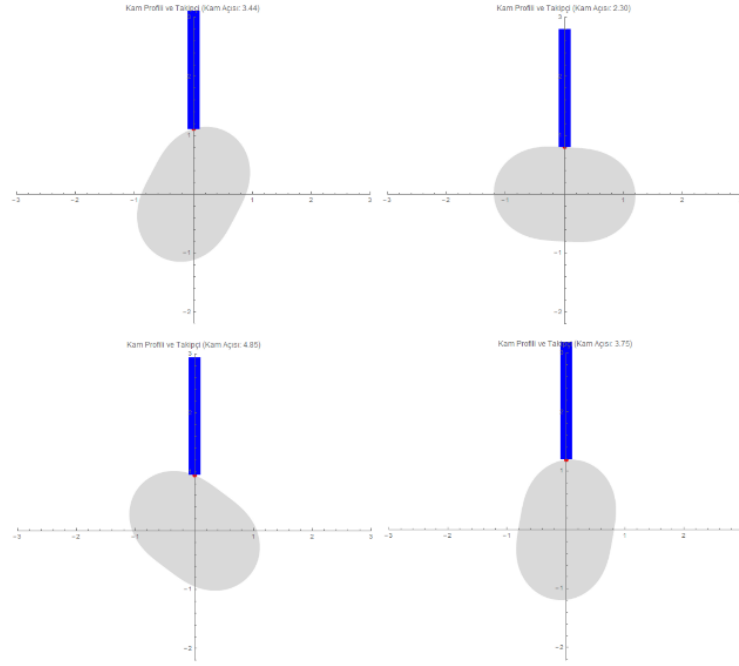
Şekil 3. Simülasyonda kullanılan takipçiler



Şekil 4. Kam profili üzerinde genlik kontrolü



Şekil 5. Dalga sayısının kam profiline etkisi



Şekil 6. Kam-takipçi animasyonu

Görselleştirme sadece animasyonla sınırlı olmayıp, eşzamanlı olarak üretilen takipçi konum grafiğinin de yardımıyla, hareketin neden-sonuç ilişkisi çok boyutlu biçimde analiz edilebilmektedir. Bu etkileşimli yapı sayesinde kullanıcı, profil türlerini değiştirerek hareket karakteristiklerinin nasıl farklılaştığını hem sayısal hem de görsel olarak deneyimleme fırsatı bulabilmektedir. Özellikle mekanizma teorisi derslerinde bu tür bir sezgisel kavrayış, öğrencilerin öğrenme sürecine aktif katılımını sağlayabilecek ve soyutlamalarla kurulan bağı güçlendirebilecek bir etkiye sahip olacaktır.

Geliştirilen simülasyon, özellikle lisans düzeyinde verilen makine teorisi derslerinde öğretim sürecine entegre edilebilecek güçlü bir araçtır. Kam-takipçi mekanizmalarının işleyişini statik çizimlerle ya da yalnızca matematiksel denklemlerle açıklamak çoğu zaman öğrenciler için yeterince sezgisel olmayabilir. Bu noktada simülasyon, öğrencilerin parametre değişimlerinin sistem üzerindeki etkilerini anında gözlemleyerek öğrenmelerini destekler. Ders içi uygulamalarda öğretim elemanları tarafından bir anlatım aracı olarak kullanılmasının yanı sıra, simülasyon öğrencilere ödev ya da proje kapsamında verilecek görevler için de uygunluk sağlayabilecektir. Öğrencilerden farklı kam profilleri veya takipçi türleriyle ilgili özel senaryolar üretmeleri ve bu senaryoları simülasyon üzerinde analiz etmeleri istenebilir.

Buna ek olarak, Mathematica'nın açık kod yapısı sayesinde simülasyon kişiselleştirilebilir ve geliştirilebilir yapıdadır. İlgili dersi alan öğrenciler, örneğin farklı takipçi türleri ya da daha karmaşık profil tanımları ekleyerek simülasyonu ileri düzeyde geliştirebilirler. Bu sayede geliştirilen simülasyon ortamı sadece bir izleme aracı değil, aynı zamanda deneysel öğrenme ve algoritmik tasarım platformu haline gelecektir. Kullanıcı dostu ara yüzü ve esnek parametre seçenekleriyle, mekanik sistemlerin analizinde sezgisel düşünmeyi teşvik eden bir araç sunulmuştur.

Bununla birlikte çalışma bazı sınırlılıklar içermektedir. Simülasyonda sürtünme, yay etkisi, takipçi kütlesi gibi dinamik parametreler göz ardı edilmiştir. Ayrıca takipçi tipi görseli sadece düz yukarı-aşağı hareket eden ve bir nokta etrafında salınım yapan izleyici ile sınırlandırılmıştır. Bu basitleştirmeler, eğitsel sadelik adına yapılmış olsa da, gerçek dünyadaki sistemlerin karmaşıklığını tam olarak yansıtmaz. Gelecek çalışmalarda, simülasyona farklı takipçi geometrilerinin görsel olarak tanımlanması, yay ve sürtünme gibi etkilerin eklenmesi, ayrıca profil tanımının kullanıcı tarafından çizimle yapılabileceği bir ara yüz modülünün entegre edilmesi planlanmaktadır. Bu tür geliştirmelerle araç, hem araştırma hem de eğitim alanlarında daha geniş kapsamlı bir analiz platformuna dönüşebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Manik, D. N. (2024). Cam-Follower Mechanism. In *Fundamentals of Mechanisms and Machines*, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1810-8_6
- [2] Lis, R. (2014). Role of visualization in engineering education, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 8(24), 111–118. DOI: 10.12913/22998624/578
- [3] Pàmies-Vilà, R., Puig-Ortiz, J., Nebot, J. (2025). Enhancing mechanical engineering education through augmented reality: A case study on mechanism and machine theory, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 0(0). doi:10.1177/03064190251317358
- [4] Merticaru, E., Merticaru, V., Nagîț, G., Mihalache, A. M., Tăbăcaru, L. L., Ripanu, M. I. (2023). Analytical, numerical and experimental analysis of a positive displacement cam mechanism—A case study, *Machines*, 11(7), 770. <https://doi.org/10.3390/machines11070770>
- [5] Wei, Z., Chen, J., Jin, G., et al. (2024). Research on dynamic analysis and simulation of cam mechanism considering contact collision, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 48, 1177–1190. <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00703-4>
- [6] Kullolli, M., Gjeta, A., Hasanaj, A. (2014). An educational software for the analysis and synthesis of cam mechanism, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 3(3), May 2014.
- [7] Mavinkurve, R., Murthy, S. (2019). Interactive visualization to teach engineering design competencies, *Proceedings of the 27th International Conference on Computers in Education*, Taiwan. <https://library.apsce.net/index.php/ICCE/article/download/2859/2735>
- [8] Sorby, S. A., Leopold, D., Gorska, R. (2014). Visualization skills in engineering education: Issues, developments, and enhancement, In *Engineering Education: Issues, Challenges, and Opportunities*, Springer. <https://www.researchgate.net/publication/259782868>
- [9] Greim, A., Taddei, F., Aumann, Q., Müller, G. (2018). Interactive web apps for visualizations in engineering education, Creativity, Innovation and Entrepreneurship for Engineering Education Excellence, *SEFI 46th Annual Conference, European Society for Engineering Education (SEFI)*, Brussels, Belgium, 807–814. DOI: 10.5281/zenodo.14672704
- [10] Sun, P., Liang, K., Wang, D., Zhang, X. (2024). Implementation of a visualization teaching approach for mechanical analysis in civil engineering structures, *Engineering Reports*, 6(12), e13004. doi:10.1002/eng2.13004
- [11] Zwiers, M. (2024). Simulation of cam mechanisms, *INTED2024, Proceedings*. <https://library.iated.org/view/ZWIERS2024SIM>
- [12] Nunes, M., Silva, R. C., Oliveira, A. B. S., Peron, G. C. (2018). Dynamical simulation of a valvetrain mechanism: An engineering education approach, *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, October 24–28, 2011, Natal, RN, Brazil.
- [13] COMSOL Blog, <https://www.comsol.com/blogs/how-to-model-a-cam-follower-mechanism>, Erişim: 20 Mayıs 2025.