



KİTAPLIK ELEMANLARI KULLANILARAK HİDROLİK TAHRİK SİSTEMİ SİMÜLASYONU

Martin BEHM
Sorn STOLL
Markus KLIFFKEN
Steffen MUTSCHLER
Ximing WANG

ÖZET

Bu çalışmada simülasyonun hidrolik tahrik sistemleri geliştirme prosesinin nasıl entegre bir parçası haline geldiği ortaya konmaktadır. Dolayısıyla bu araçlar sadece simülasyon uzmanları tarafından değil, aynı zamanda mekanik tasarım, uygulama ya da sistem mühendisliği departmanları tarafından da giderek artan bir oranda kullanılmaktadır.

Önce, hidrolik bileşenleriyle birlikte simülasyon kavramı, yani etkinliklerin teknik “omurga”sı ortaya konmuştur. Simülasyon tekniklerinin geliştirme prosesine entegrasyonu, hidrolik tahrik sistemleri ile ilgili üç yeni proje aracılığıyla gösterilmiştir (*Şekil 1*).

Yani, aşağıda belirtilen hususlar ortaya konmuştur:

- aksel piston ünitelerinin geliştirilmesinin, son derece ayrıntılı fiziksel modeller tarafından nasıl desteklendiği,
- verim modelleri kullanılarak transmisyon tasarımlarının nasıl değerlendirildiği, ve “Döngü içi yazılım” konfigürasyonu kullanılarak hidrostatik tahrik fonksiyonlarının nasıl geliştirildiği

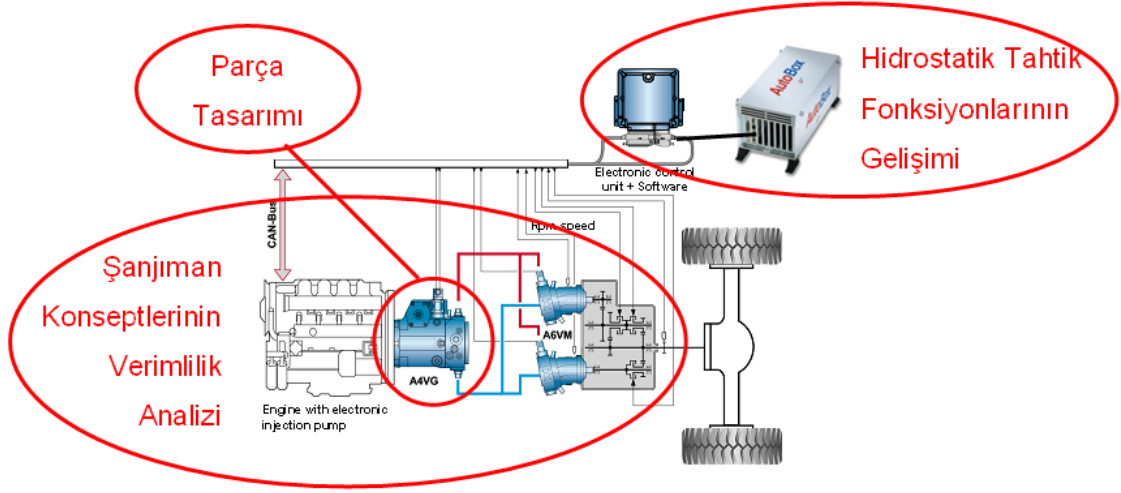
ABSTRACT

In this paper, it is shown how simulation is becoming an integral part of the development process of hydraulic drive systems at Bosch Rexroth. Thereby, these tools are not only used by simulation experts but increasingly in departments for mechanical design, application or system engineering.

First, the simulation concept – the technical “backbone” of the activities – is introduced together with the library of Rexroth components. The integration of simulation techniques in the development process is shown via three recent projects regarding hydraulic drive systems (*Figure 1*).

This way, it is shown,

- how the development of axial piston units is supported by highly detailed physical models,
- how transmission concepts are evaluated using efficiency models, and how hydrostatic drive functions are developed using a “Software-in-the-loop” configuration



Şekil 1. Simülasyon tarafından desteklenen transmisyon geliştirme etkinliklerinin özellikleri

1. GİRİŞ

Simülasyon etkinlikleri geleneksel olarak, diğer geliştirme departmanlarının az ya da çok uzağında yer almış olan simülasyon uzmanları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte yeni simülasyon araçları, daha güçlü teknik yeteneklere ilaveten, daha ergonomik kullanıcı arayüzleri sunmaktadır. Bu, simülasyon etkinliklerinin, önemli etkinlikleri olan mühendislik departmanları içine yayılmasına olanak sağlamıştır.

Bu durum hidrolik ürünlerinin bir kitaplık tasarımıyla birlikte, özlü bir araç zinciri (simülasyon) oluşturularak sistematik olarak desteklenmiştir. Kavramın tanıtıcı bir profilinden sonra, geliştirme etkinliklerindeki önemli özelliklerin entegrasyonu seçme uygulamaları ortaya konmuştur.

2. SİMÜLASYON KAVRAMI

3 katmanlı, hiyerarşik bir simülasyon kavramı geliştirilmiştir:

- **Altmontaj seviyesi**, çok ayrıntılı bir şekilde tek bir parçanın ya da bir parçalar grubunun tasarımıyla ilgilenmektedir. Fiziksel bileşenleri yüksek bir hassasiyetle modellemek için, Sonlu Elemanlar ya da CFD (Computational Fluid Dynamics) gibi simülasyon araçları kullanılmaktadır.
- **Bileşen seviyesi**'nde, bir bileşen içindeki tekil parçaların birlikte çalışması, konsantre parametreler kullanılarak, fiziksel modellerle incelenir. Burada tasarım prosesi, işlevsel davranışın simülasyonu yapılarak desteklenir.
- **Sistem seviyesi**'nde, tamamlanmış araçlara kadar hidrolik devreler ele alınır. Tekil bileşenler genellikle, karakteristik eğriler ve genelleştirilmiş dinamiklerle betimlenir. Simülasyonda, tüm sistemin işlevi göz önüne alınır.

Kitaplık, **bileşen seviyesi** ve **sistem seviyesi** üzerinde gerçekleştirilen işlevsel analiz için geliştirilmiştir. Denk düşen araçlar zinciri aşağıda belirtildiği gibi seçilmiştir:



- fiziksel modellere dayanan ayrıntılı hidrolik simülasyon için **AMESim**,
- sistem entegrasyonu ve kumanda tasarımı için **MATLAB/Simulink**, ve
- gerçek zamanda fonksiyon geliştirme için **dSpace**.

Bu araçlar kendilerine ilişkin alanlarda çok güçlüdür ve birbirleri arasında iyi bir iletişime ve veri alışverişine olanak sağlamaktadır.

Kitaplık yapısı Tablo 1’de gösterilmiştir; burada modellerin karmaşıklığı, farklı uygulama alanlarını temsil eden dört gruba ayrılmıştır.

Tablo 1. Mobil hidrolik sistemlerin kitaplık yapısı

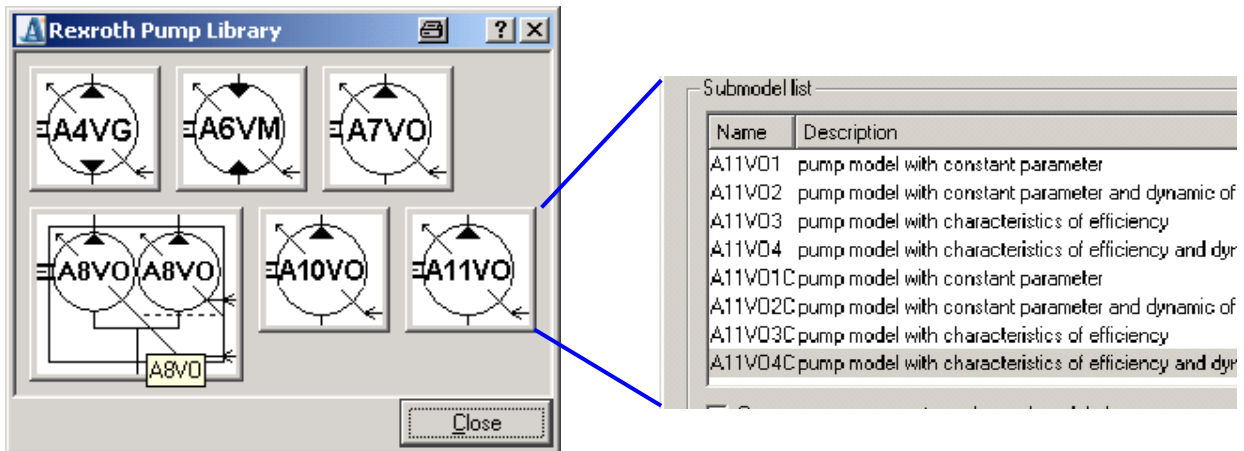
Model kategorisi	Ürün geliştirme	Uygulama	Sistem entegrasyonu	Enerji verimi
Model seviyesi				
Yazılım	AMESim	AMESim (Simulink, dSpace)	AMESim Simulink, dSpace	AMESim Simulink
Model özellikleri	Konsantre parametreleri olan ayrıntılı fiziksel model	Kısmi fiziksel ve soyutlanmış model	Soyutlanmış dinamikler, verimler	Durağan modeller, verimler

“Ürün Geliştirme” ve “Uygulama” bölümlerinde kullanılan son derece ayrıntılı fiziksel modeller (HHHH, HHH), sadece AMESim’de etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu karmaşık modeller sadece özel talep üzerine oluşturulur ve daha sonra kitaplığa entegre edilir.

“Sistem Entegrasyonu” ve “Enerji Verimi” bölümlerine yönelik daha az ayrıntılı modeller (HH, H), ayrıca Simulink’te de oluşturulabilir. Bu modeller, örneğin gerçek zaman özelliklerinin (dSpace) dikkate alınmak zorunda olduğu durumlarda, ana dinamiklerin ve karakteristik eğrilerin, (dinamik) verim değerlendirmesi ya da kumanda tasarımı için yeterince doğru oldukları durumlarda kullanılır.

Özellikle bu seviye için çok çeşitli modeller vardır. Bunlar aşağıda belirtilenleri kapsar:

- aksenal pistonlu pompalar ve motorlar (Şekil 3),
- mekanik transmisyon elemanları (planet dişliler, mekanik kavrama),
- dizel motor



Şekil 3. Aksenal pistonlu üniteler için AMESim kitaplığı (,)



Kitaplık elemanlarının tasarımı için, hedefleri aşağıda belirtilmiş olan genel ilkeler belirlenmiştir:

- programlamadaki yedekleme gerekliliğinin ortadan kaldırılması,
- her ortamda özdeş (ya da çok benzer) sonuçların elde edilmesi,
- hızlı ve güvenilir simülasyona olanak sağlanması,
- yeterli belgeleme de dahil olmak üzere uygun bir kullanıcı arayüzünün sağlanması.

Kitaplık elemanları çoğu zaman “iş üzerinde” oluşturulur, yani bileşen modelleri oluşturulur ve geliştirme projeleri için gerekli oldukça doğrulanır. Bu durumda modeller, kitaplık içine entegre edilmelerinden önce, genel ilkelere uymaları için tekrar işlenir. Böylece kitaplık sürekli bir şekilde büyür.

3. HİDROSTATİK TAHRİK SİSTEMLERİNE YÖNELİK UYGULAMA

İzleyen örnekler, model kitaplığının elemanlarını kapsayan entegre simülasyon etkinliklerine odaklı bir şekilde model bazlı tipik geliştirmeleri göstermektedir.

3.1. Eksenel piston ünitelerinin tasarımı

Eksenel pistonlu değişken debili pompalar, sanayideki çeşitli makineler için basınç ve akış sağlamak üzere hidrolik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrolik güç sistemlerindeki temel işlevi nedeniyle pompanın çalışmasının ve karakteristiklerinin, tüm sistemin çalışması ve karakteristikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu nedenle, onlarca yıl boyunca pompanın dinamik davranışı incelenmiştir; burada uzmanlar, pompanın çeşitli bileşenlerinin karmaşık ve doğrusal olmayan geometrisini ve hareketini modellemiştir /Iva93/, /Gil99/, /Man02/.

Pompaların geliştirilmesini desteklemek amacıyla, AMESim simülasyon ortamında “ürün geliştirme” kategorisinden son derece ayrıntılı pompa simülasyon modelleri geliştirilmiştir.

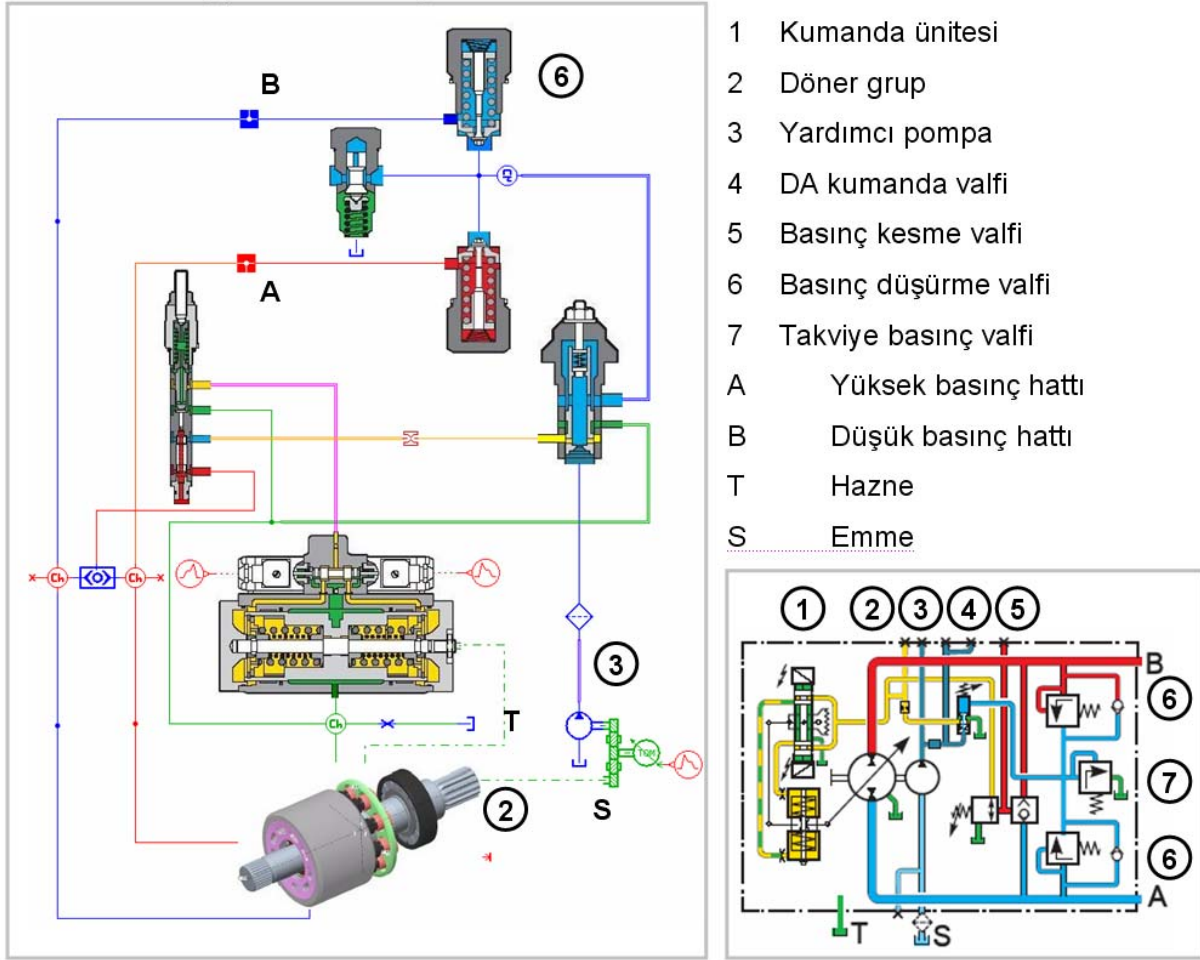
Şekil 4’te, denk düşen hidrolik devre ile birlikte, bir kapalı devre uygulamasına yönelik bir kapalı çevrim eksenel pistonlu pompanın örnek bir simülasyon modeli görülmektedir.

Model, hidrolik devredeki elemanların kendi doğrudan karşılıklarını simülasyon modelinde bulacakları şekilde tasarlanmıştır. Model geometrik olarak uygulanmış ve tasarım verileri kullanılarak parametrelendirilmiştir. İşlevsel elemanlar, hidrolik devrede olduğu gibi hidrolik hatlar aracılığıyla birbirine bağlanmıştır.

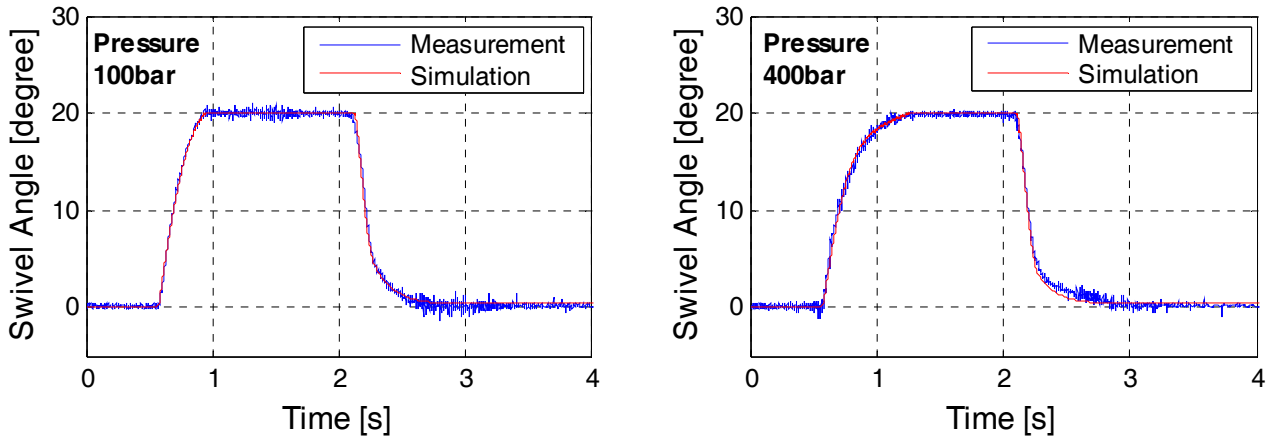
Diğer yandan, simülasyon modelindeki çoğu eleman teknik çizimler gibi gösterilmiş ve yay ön yükleri ya da delik çapları gibi hangi tasarım parametrelerinin modele dahil edildiğini belirtmiş ve böylece parametre incelemeleri için kullanılabilir özellikte olmuştur. Hidrolik devrenin genel özellikleri ve mekanik çizim bir araya getirildiğinden, bu uygulamanın çok kullanıcı dostu olduğu kanıtlanmıştır. Diğer yandan, simülasyona özel elemanlar en aza indirilmiştir.

Tasarım mühendisleri, bu kullanıcı arayüzü sayesinde, elemanların işlevselliğini ve etkileşimlerini ve bunun yanı sıra tasarım parametrelerindeki değişimlerin etkilerini incelemek üzere simülasyon modelini hızlı bir şekilde kullanabilmislerdir.

Model yapısı, aşağıda belirtilen birçok avantajı sunan modüler bir kavrama dayandığından tamamen açıktır:



Şekil 4. Sol: Bir pistonlu pompanın simülasyon modeli. Sağ: İlgili hidrolik devresi



Şekil 5. A4VG pompanın simüle edilmiş ve ölçülmüş dönme açılarının karşılaştırılması

- sistemin karmaşıklığı simülasyon için kademeli olarak artırılabilir,
- model kolaylıkla farklı ürün boyutlarına ve serilerine uyarlanabilir,
- pompanın temel ünite modeli, az bir çabayla çeşitli kumanda stratejileri (kumanda üniteleri) ile bir araya getirilebilir.



Son derece ayrıntılı pompa modelinin validasyonu, simülasyon sonuçları ve ölçümler çeşitli yük koşulları altında karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5, A4VG pompanın farklı yük basınçlarındaki ayrıntılı simülasyon modeli ile ölçülen davranışı arasında iyi bir uyuşma olduğunu göstermektedir.

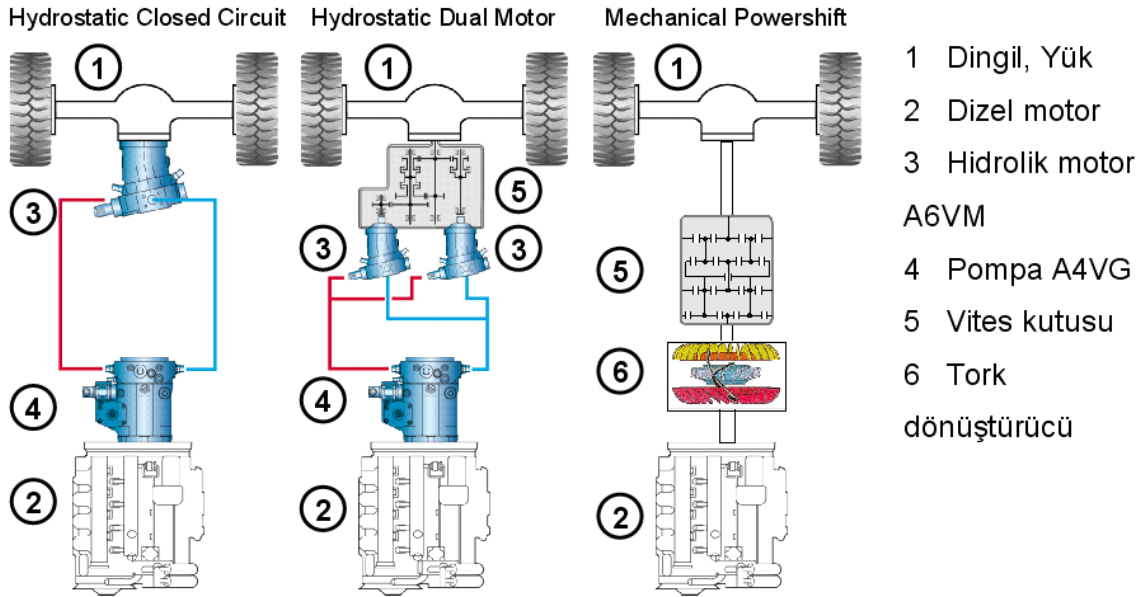
Eksenel pistonlu üniteler için onaylanmış modeller, aşağıda belirtilen hususları desteklemek için kullanılmıştır:

- yeni ürün geliştirme çalışması için parametre araştırması,
- mevcut seri ürünlerin optimizasyonu,
- müşteri taleplerinin analizi.

Ayrıca, eksenel pistonlu ünitelerin ayrıntılı simülasyonu, ürün geliştirme mühendislerini ürünün iç dinamiklerinin derinlemesine anlaşılması konusunda desteklemektedir.

3.2. Transmisyon Tasarımlarının Değerlendirilmesi

Transmisyon sistemlerinin tasarımı için, model temelli bir analiz tasarım seçeneklerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar. Bu şekilde, temsili çalışma çevrimleri kullanılarak, farklı tasarımların dinamik etkileri ve bunun yanı sıra enerji verimleri ele alınabilir.



Şekil 6. Transmisyon tasarımları

Burada, tekerlekli yükleyicilere yönelik üç farklı transmisyon tasarımının performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Her durumda, mekanik güç bir dizel motor tarafından sağlanmış, transmisyon tarafından dönüştürülmüş ve yüke uygulanmıştır.

Hidrostatik kapalı devre sistemi (sol), bir pompa ve bir motora sahip standart bir devredir.

Hidrostatik ikili motor tasarımı (orta), paralel bağlı iki hidrostatik motoru kapsayan kapalı bir hidrostatik devreden oluşmaktadır. En düşük hız aralığında, her iki motor, çok büyük tek bir motor gibi davranarak paralel çalışmaktadır. Orta hız aralığında, daha büyük olan motor tek başına çalışmakta ve yüksek hızlarda ise, küçük motor düşük bir mekanik dişli oranıyla çalışmaktadır. Sadece bir motor çalıştırıldığında, diğeri, akışının bloke olması için tekrar sıfıra getirilmektedir /Mob00/.

Mekanik güç değiştirme transmisyonu (sağ), hidrodinamik bir tork dönüştürücünden, bir geri vites ünitesinden ve yük altında değiştirilebilen dört ileri vitesli bir transmisyondan oluşmaktadır.

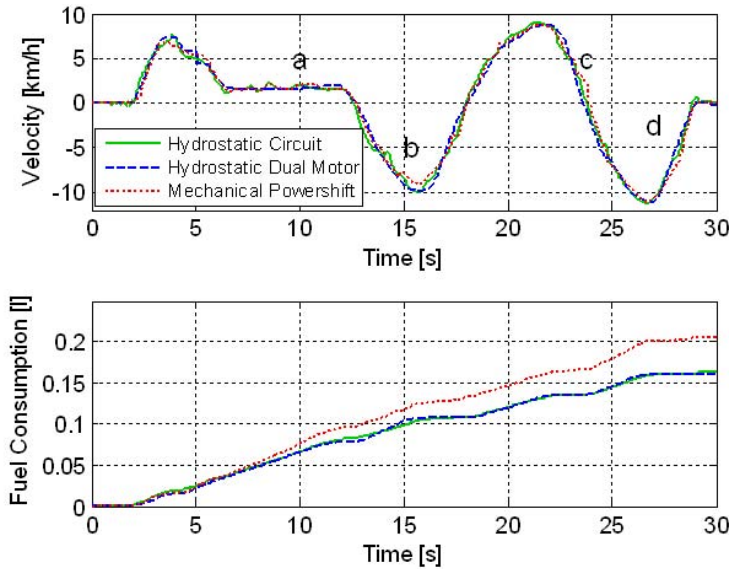
AMESim içindeki her transmisyon tasarımı için, "Sistem Entegrasyonu" kategorisinden simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Böylece çoğu bileşen, yani dizel motor, hidrostatik bileşenler, kavramalar ve planet dişliler, verim bilgilerine ilaveten soyutlanmış dinamikleri de kapsayan kitaplıktan alınmıştır.

Bu karşılaştırmalı simülasyon çalışmasında, dizel motorun transmisyon tarafından doğrudan ve dolaylı olarak etkilenen yakıt tüketimi karşılaştırılarak sistemin genel verimi değerlendirilmiştir. Doğrudan etki, sistem bileşenlerinin güç kaybıdır. Dolaylı etki, dizel motorun çalışma noktasının bir fonksiyonu olarak yakıt tüketimidir. Bunun çalışması ve dolayısıyla yakıt tüketimi önemli ölçüde dizelin yüküne bağlıdır ve bu da, transmisyon tasarımıyla birlikte yük karakteristikleri tarafından belirlenmektedir.

Karşılaştırmaya yönelik referans tahrik çevrimine, aracın hareketi Şekil 7'de belirtildiği gibi bir "Y" harfine benzediğinden "Y çevrimi" adı verilmiştir.

Tekerlekli yükleyici ileri hareket etmekte ve yükü almakta (a), geri geri başlangıç noktasına gelmekte (b), tekrar ileri hareket etmekte ve başka bir konumda yükü boşaltmaktadır (c). Sonunda tekrar başlangıç noktasına dönmektedir (d).

Karşılaştırma için, çift motorlu bir Liebherr transmisyon ile donatılmış tekerlekli bir yükleyicide bir çalışma çevrimi ölçülmüştür.



Şekil 7. Sol: Y çevriminde farklı transmisyonları, hızı ve yakıt tüketimi olan tekerlekli bir yükleyiciye ilişkin simüle edilmiş karşılaştırma. Sağ: Çevrim ilkesi.

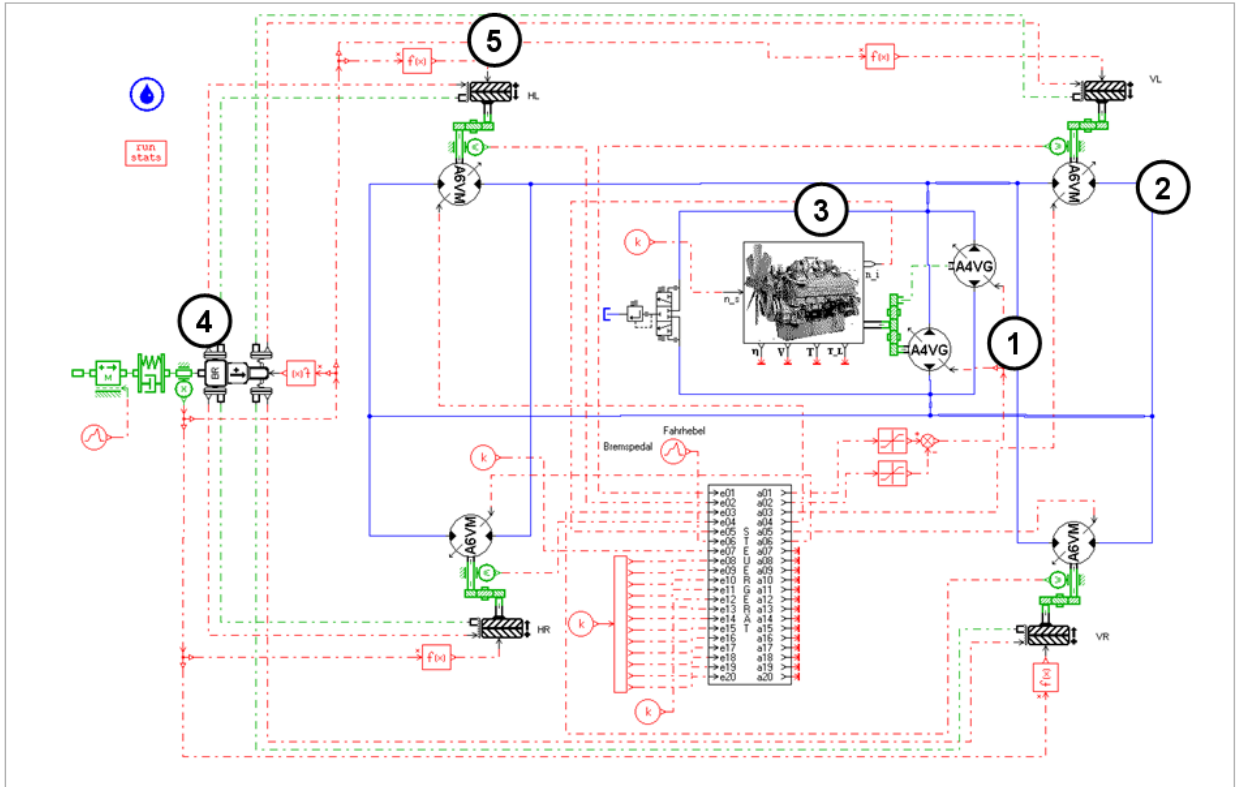
Ölçülen hız simülasyon modellerine giriş olarak verilmiş (bir PI kumanda ünitesi aracılığıyla) ve ölçülen basınçlar yük olarak girilmiştir. Simüle edilen her tekerlekli yükleyicinin hızları, Şekil 7'nin üst grafiğinde gösterilmiştir. Hızlardaki küçük farklar, transmisyonların ve bunların kumanda ünitelerinin karakteristiklerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır.

Alt grafik, zamana karşı entegre yakıt tüketimini göstermektedir ve her iki hidrostatik tasarım için benzer yakıt tüketimi sonuçları elde edilmiştir. Bu, benzer karakteristikleri olan standart devreye benzer bir şekilde davranmak üzere sadece birinci ve ikinci tahrik aralığında çalışan çift motorlu

tasarım için, “Y çevrimi”nin düşük çalışma hızlarından kaynaklanmıştır. Bu hidrostatik transmisyon tasarımları, güç değiştirme sistemi ile karşılaştırıldığında yakıt tasarrufunda yaklaşık % 25’lik bir avantaj sağlamıştır.

Sonuçlar, transmisyon tasarımlarının bir ilk değerlendirmesinin, burada referans olarak “Y çevrimi” ile gösterilmiş olan simülasyon halinde gerçekleştirilebileceğini doğrulamaktadır. Bu tür modeller, karar alma süreçlerinin, doğrudan deneysel doğrulama olmadan bile bu sonuçlara dayandırılmasına olanak sağlayan bir kaliteye ulaşmıştır.

3.3. Hidrostatik Tahrik Fonksiyonları



Şekil 8. ECU’lu (elektronik kumanda ünitesi) araç hidrolik sisteminin AMESim modeli

AMESim, makine fonksiyonlarının geliştirilmesi için, hidrolik devreleri ve bunun yanı sıra aracın kendisinin baskın yapısal özelliklerini simüle etmek için de kullanılmıştır. Şekil 8, bir test aracının komple bir simülasyon modelini göstermektedir. Hidrolik bileşenler kitaplardan alınmış ve uygulanabilir oldukları ölçüde parametrelendirilmiştir. Devre, bir kez oluşturulduktan sonra, benzer transmisyon sistemleri olan başka araçlara kolayca uyarlanabilir.

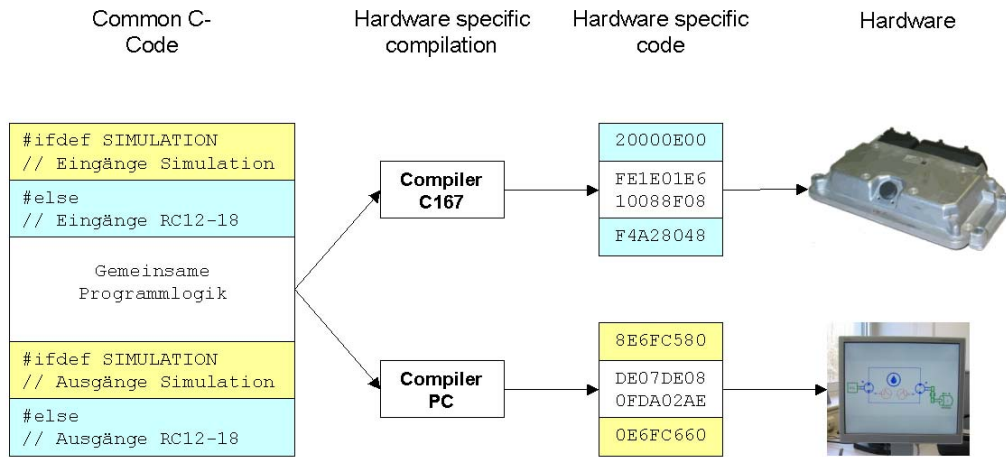
Hidrolik devrede, iki adet A4VG değişken debili pompa (1) ve verim bilgileri ve soyutlanmış kumanda dinamikleri olan “sistem entegrasyonu” kategorisinden dört adet A6VE değişken debili motor (2) kullanılmıştır. Burada da, dizel motor modeli (3), tahrik ekonomisini incelemek üzere yakıt tüketimini kapsamıştır. Tahrik dinamikleri, araç kütlesi, ağırlık merkezi ve eğim göz önüne alınarak, yapısal bir model (4) tarafından sağlanmıştır. Ayrıca, kaymayı doğru bir şekilde hesaplamak amacıyla, seçilebilir lastik-zemin karakteristikleri ile birlikte tekerlekli bir model (5) kullanılmıştır.

Mikro kumanda üniteleri hidrostatik transmisyon sistemlerinde giderek daha yaygın bir şekilde kullanıldığından, modele özel bir programlama arayüzü ilave edilmiştir (Şekil 9). Bu arayüz, komple

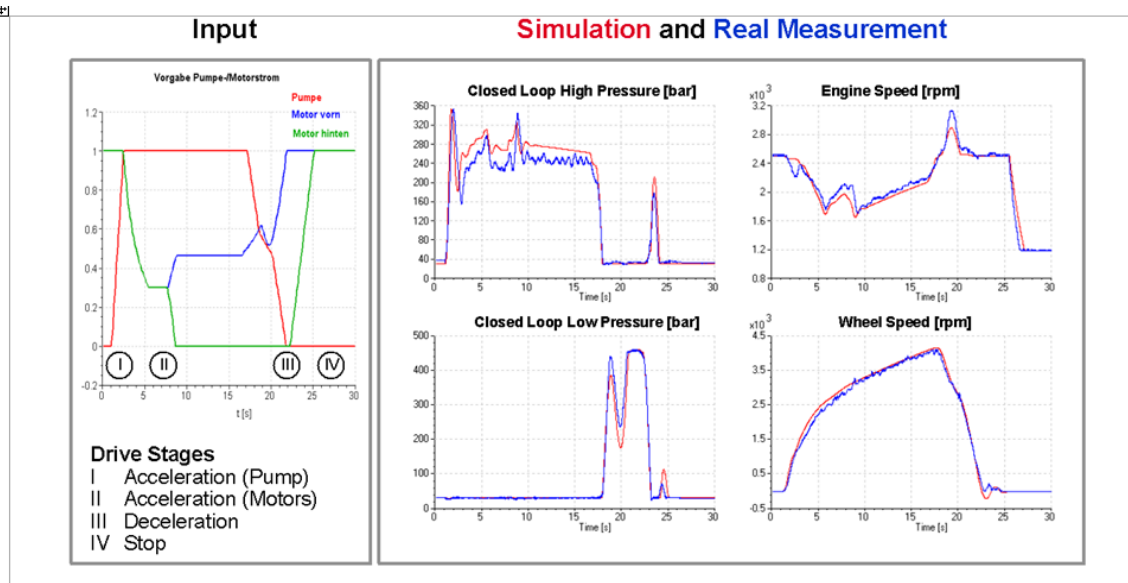


tahrik yazılımının, normal olarak araç kumanda ünitesi (RC 6-9) üzerinde çalışan AMESim simülasyon ortamı içine dahil edilmesine olanak sağlamaktadır.

Arayüz, bir “Döngü içi yazılım” yapısı halinde tasarlanmıştır. İşlevsel kod, hem simülasyon hem de mikro kumanda ünitesi için aynıdır. Giriş ve çıkış fonksiyonlarını sağlayan arayüz kodunun, kendi ortamları için ayrı ayrı, sadece bir kez uygulanması gerekmektedir.



Şekil 9. Döngü içi yazılım



Şekil 10. Karşılaştırma simülasyonu – Tipik bir tahrik çevriminin test edilmesi

Böylece kod, test aracındaki gerçek mikro kumanda ünitesi üzerinde çalışmaya derlenmeden önce, simülasyon ortamında geliştirilebilir ve test edilebilir.

Simülasyon, Şekil 10'daki simülasyon ile test sonuçları arasındaki karşılaştırmada görülebileceği gibi, aracın davranışını çok büyük bir doğrulukla yansıtmaktadır.



Simülasyon modeline dayanılarak, bir dizi yeni ve yenilikçi tahrik fonksiyonu geliştirilmiştir. Bunlar kayma önleyici kumandayı, otomotiv sürüşünü ve çeşitli fren fonksiyonlarını kapsamaktadır. Bunlar, klasik hidrolik kumanda ünitelerinin tersine programlama mantığının kullanıldığı son derece dinamik hidrolik motorların ve bunların daha yüksek olan esnekliğinin avantajlarından yararlanmaktadır. Fonksiyonlar ve parametreler, zaman alıcı ve pahalı araç testlerinden önce, simülasyon ortamında çok ayrıntılı bir şekilde test edilebilir ve optimize edilebilir.

SONUÇ

Hidrostatik transmisyon geliştirme etkinlikleri ile ilgili üç örneğe dayanılarak, simülasyon tekniklerinin, mobil uygulamalara ilişkin farklı geliştirme etkinliklerinde kendi entegrasyonlarını nasıl buldukları ortaya konmuştur. Bu, özlü bir araç zincirinin oluşturulması ve bunun sonucunda, ürün geliştirmeye yönelik şirket içi bileşenlerin kitaplık elemanlarının geliştirilmesi ve kullanımı yoluyla başarılıdır.

Kitaplık elemanları "iş üzerinde", yani geliştirme projelerine paralel olarak geliştirildiğinden, kitaplık, en yaygın elemanları bünyesine alarak sürekli büyümektedir. Bu, hidrolik sistemlere odaklanmış AMESim içindeki elemanları ve işlevsel geliştirmeye (burada anlatılmayan) odaklı Matlab/Simulink içindeki elemanları kapsamaktadır.

Simülasyon etkinliklerinin, ürün geliştirme zaman ve maliyetini azaltmak, ürün kalitesini arttırmak ve emniyetli ve güvenilir çalışma için dinamik davranışı öngörebilmek üzere ürün geliştirme süreçlerinin giderek artan bir oranda entegre bir parçası haline gelmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] /Iva93/ **Ivantysyn, J., Ivantysyn, M.**, *Hydrostatische Pumpen und Motoren – Konstruktion und Berechnung*. 1. Auflage, Vogel Buchverlag, 1993.
- [2] /Gil99/ **Gilardino L.; Mancò, S.; Nervegna, N.; Viotto, F.**, *An Experience in Simulation: The Case of a Variable Axial Piston Pump*. Tokyo, Japan, JHPS 1999.
- [3] /Mob00/ **Mobile 2000**, *International Mobile Hydraulics Conference*, RD 00 207/10.00. Bosch Rexroth AG, Elchingen, Ulm, 2000.
- [4] /Man02/ **Mancò, S.; Nervegna, N.; Lettini, A.; Gilardino L.**, *Advances in the Simulation of Axial Piston Pumps*. Nara, Japan, JSFP 13/11/2002.
- [5] /Mob03/ **Mobile 2003**, *International Mobile Hydraulics Conference*, RE 00 207/10.03. Bosch Rexroth AG, Elchingen, Ulm, 2003.
- [6] /Kli04/ **Kliffken, M.G.; Behm, M.**, *Antriebsschlupfregelung für hydrostatische Fahrtriebe*. 4. IFK, Dresden, 2004
- [7] /Koh05/ **Kohmäscher, T.; Deeken, M.; Lang, T.; Deiters, H.; Neubert, T.**; *Antriebsstrangkonzepete mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung und Verifikation eines Softwaretools am Beispiel eines Radladers*. O + P. Ölhydraulik und Pneumatik, Band 49 (2005) Heft 3, Seite 154-157, ISSN 0341-2660