

6. teknik kongre

BAĞLAÇ DİYAGRAMLARI KURAMI VE UYGULAMALARI NECDET SEN

UDK: 513.83

ÖZET

Bu çalışmada, karmaşık fizik yapıtlı toplu bileşenli devinik dizgelerin (dinamik sistemlerin) birleştirilmiş modellerini bulmayı amaçlayan ve dizge/denetim mühendisliği tekniğinde henüz yeni bir konu olan "bağlaç diyagramları" yöntemi anlatılmış ve çeşitli uygulamalar verilmiştir. Bağlaç diyagramlarının özellikle dizge benzetiminde (sistem simülasyonu) başarı ile kullanılabileceği örneklerle gösterilmiştir.

SUMHARY

in this paper, the "bond graphs" method, which aims at finding the combined models of complicated dynamic systems consisting of lumped components, and which is a new subject in system science and control engineering, is presented; and several applications of the method are given. it is shown by examples that the bond graphs method can be successively used' in system simulation.

1. GİRİŞ

Bir devinik dizgenin çözümü ya da biresiminde kuşkusuz ilk adım, o dizgenin uygun bir matematiksel tanımlamasının (modelinin) bulunmasıdır. Matematiksel model, ilke olarak, verilen bir dizgenin doğal yapısından ve davranışı sırasında dizgeyi oluşturan fiziksel bileşenlerin sağladıkları fiziksel yasalardan yararlanarak elde edilir. Ancak matematiksel modelin bulunması, bazı özel durumlar dışında, kolay olmayan bir iştir ve çoğu kez yanlışlıkların yapılmasına yol açar. Öte yandan, teknikte son yıllardaki hızlı gelişmelerin sonucu kurulmakta olan dizgelerin boyut ve karmaşıklık derecelerinin artmakta oluşu, model bulma sorununun önemini artırmış ve güçleştirmiştir. Bu durumda mühendisler, yeni

Necdet Şen, Doç.Dr., KTÜ

Elektrik Mühendisliği 225

6. teknik kongre

ve güçlü yöntemlerin bulunması ve geliştirilmesi gereğini sezmişlerdir. Bu gerçeğin gözönüne alınmasıyla, günümüzde pekçok araştırmacı devinik dizgelerde çözümlene yapabilmek ve özellikle model sorununu çözebilmek için, dizgelerin geometrik yapısından giderek, sistemdeki değişkenlerin birbirleri arasındaki bağıntıları ilgili fiziksel yasaları sağlayacak biçimde yazma yolunu seçmişlerdir. Fiziksel benzeşim ilkesinin benimsenmesiyle elde edilecek fizik bir devreden yararlanmakla, elektrik devreleri kuramında yapılageldiği gibi doğrusal çizgeler tekniği ve onun topolojik özellikleri kullanılmaktaysa da karmaşık fizik yapıları bir dizgede değişik enerji bölgeleri arasındaki çoğu kez çizgelerle doğrudan doğruya modellenememesi yöntemin kullanılabilmesini kısıtlar. Bu kısıtlama uç-çizgeler kavramından yararlanarak giderilebilirse de bir takım uzun çözümsel hesaplamaların yapılmasını gerektirir. Ayrıca topolojik kuram ancak toplu bileşeni durumlarda kullanılabilir, öte yandan, "kütle-indüktans" fiziksel benzeşimi için her zaman doğrusal çiege modeli bulunmayabilir [1]. Oysa, verilen bir fiziksel dizgenin yapısı ne olursa olsun, doğrudan dizgeye bakarak gözlem yoluyla bağlaç modelinin bulunabilmesi, soruna çözüm arayan kişi ile dizge arasında bir ilişki sağlamış olur. Eğer bir çizge modeli, dizgedeki değişkenler ve dış etkiler arasındaki fiziksel etkileri belirleyebilecek biçimde çizilebilirse, çözümlenelerde geçerli olabilecek genelleştirilmiş bir yol bulunmuş olur. Bu düşünceden hareketle geliştirilmiş olan "bağlaç diyagramları" kuramı da işte böyle bir amacı gütmektedir. Günümüzde değeri henüz anlaşılmaya başlanan bağlaç diyagramları yöntemi, gerçekte devinik dizgeler ve denetim mühendisliğinden esinlenerek, Massachusetts Institute of Technology'de 1961'de Paynter [2] tarafından bulunup yine aynı yerde Karnopp ve Rosenberg [3,4] ve Thoma [5] tarafından geliştirilmiş ve diğer birçoklarınınca [6-10] çeşitli devinik dizge araştırmalarında kullanılmıştır. Bağlaç diyagramları kuramının en önemli özelliği, verilen bir karmaşık fiziksel yapıyı dizgenin bilgisayarla benzetimini yapabileceği olanaklarını içermesidir [3,9,10].

Genel olarak bağlaç diyagramları yönteminin sağladığı yararlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Verilen dizgenin yapısı ve karmaşıklık özelliği ne olursa olsun, dizgeyi oluşturan fiziksel bileşenler arasındaki bağlaşımları da göz önüne alarak birleşmiş bir işlemsel geometri kurulabilir.
2. Kurulan bu "çok-kapılı geometrik yapıya" bakarak dizgenin içindeki enerji bağlaşımları arasındaki enerji/güç alışverişini gösterecek olan matematik bağıntılar yazılabilir. Buna bağlaç diyagramlarının topolojisi gözüyle bakılabilir.

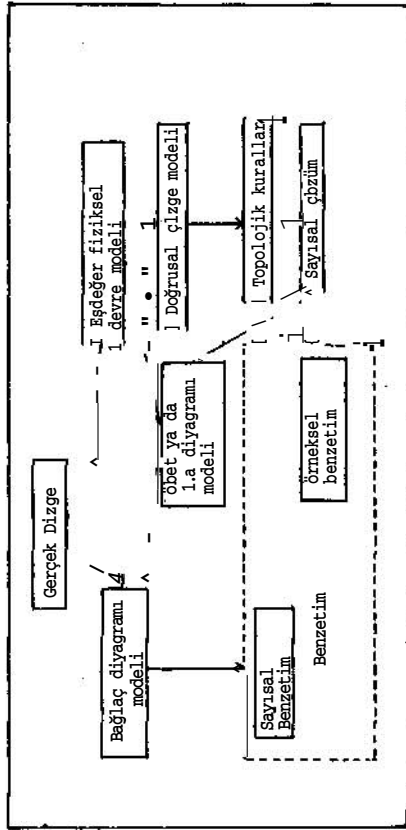
3. Herbir bağlaç bileşeni ilgili olduğu enerji kapısının iç ve uç değişkenini birlikte gösterdiğinden, n bileşenli bir bağlaç diyagramı 2n düğümlü bir işaret-akışı diyagramına ya da ilişkin bir öbek diyagramına (block diagram) dönüştürülebilir. Bu ise örneksel bilgisayar benzetimine olanak sağlar.
4. Yine enerji kapıları arasındaki ilişkiler fiziksel bileşenlere göre düzgün sıralar biçiminde yazılarak sayısal bilgisayar programlaması da yapılabilir. Paynter tarafından ileri sürülen ve Ro8enberg [3] tarafından geliştirilen ENPORT programı bu amaca yöneliktir.
5. Bağlaç diyagramları ortak bir geometrik model kurabilme olanağı verdiği için, değişik sınıftan devinik dizgelerin devre modellerinin elde edilmesinde yararlı olur. Öte yandan, fiziksel benzeşim ilkesi yardımıyla böyle bir devre elektrik devresi olarak gerçekleştirilerek elde edilen modelde birtakım ayarlamalarla, dizgenin fiziksel yapısı en iyi değerlerde yeniden kurulabilir (optimumlaştırma sorunu).
6. Bağlaç diyagramları dizgenin iç yapısını gerçeğe uygun olarak gösterdiğinden öğretici bir değer taşır. Oysa bu özellik ne öbek diyagramlarında ne de işaret-akışı diyagramlarında olmayıp birtakım hesaplamaları gerektirir. Öbek ve işaret-akışı diyagramlarının yalnız doğrusal matematik nitelikteki dizge modelleme yöntemleri olmalarına karşılık, bağlaç diyagramları genel bir özellik taşır.
7. Bağlaç diyagramları doğrudan doğruya enerji alışverişi olaylarının çizimsel bir modellemesi olduğundan, bağlaç diyagramından adım adım gerçek fiziksel dizgeye geçilebilir; bu özellik devinik dizgelerin bireşimi olanaklarını da kabaca verebilir.

Bağlaç diyagramlarının devinik dizgeler kuramı yöntemleriyle ilişki şekil 1'de açıklanmıştır.

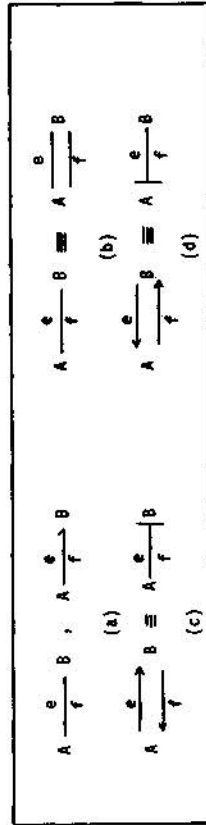
2. BAĞLAÇ BİLEŞENLERİ, ENERJİ KAPILARI

2.1 Genel Tanımlar

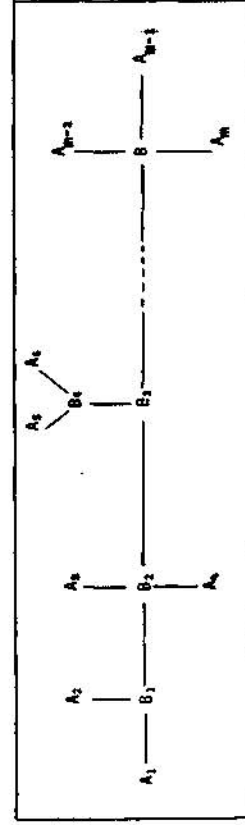
En ilkel biçimde bir bağlaç bileşeni A ve B gibi iki alt dizge ya da iki enerji kapısı arasında şekil 2a'da görülen ve bu iki kapıyı birbirine bağlayan bir çizgi parçasıyla gösterilir. Bu gösteriliş gerçekte A dan B ye (ya da B den A ya) bir e-f gücünün aktarıldığını göstermek üzere Paynter [2] tarafından tanımlanmıştır. Böyle bir bağlaç bileşeni, A ve B enerji kapıları arasında e uç değişkeni (ya da çaba değişkeni) ve f iç değişkeni



Şekil 1. Devinik dizgeler kuramı yöntemleri ve bağlaç diyagramlarıyla ilişkisi



Şekil 2. Bağlaç bileşenlerinin gösterilişleri



Şekil 3. Bir bağlaç diyagramı

| Tek-kapılı bileşenler ve sınıflandırılması | | | |
|------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bileşen | Gösterilim | Yönlendirilmiş bağlaç gösterilişi | Matematiksel |
| akış kaynağı | J_g | J_g | $\dot{i}(t) = J_g(t)$ |
| caba kaynağı | V_g | V_g | $v(t) = V_g(t)$ |
| enerji-tüketen bileşen | R | R | $\bullet \sum n(t) = f_R(\dot{T}_R)$ |
| enerji biriktiren, sıgaç türü bileşenler | C | C | $\dot{T}R (O = gR(\dot{V}_R))$ |
| enerji biriktiren, indükleş türü bileşenler | L | L | $\dot{V}_c(t) = f_c(\dot{x}_c dt)$ |
| | | | $\dot{T}c(t) = -f - g_c(\dot{V}_c)$ |
| | | | $\dot{T}_L(t) = g_L(\dot{V}_L dt)$ |
| | | | $\dot{V}_L(t) = d$ |
| İki-kapılı bileşenler | | | |
| dönüştürgeç türü enerji aktarıcılar | J_{TR} | J_{TR} | $\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n \\ n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$ |
| | J_{TR} | J_{TR} | $\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{n} \\ \frac{1}{n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix}$ |
| topaç türü enerji aktarıcılar | J_R | J_R | $\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix}$ |
| | J_R | J_R | $\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{r} \\ \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$ |
| Üç-kapılı bileşenler | | | |
| O-bağlaç birleşimi (çaba değişkeni değişmez enerji kapısı) | $U-L$ | $U-L$ | $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V}_3$ |
| 1-bağlaç birleşimi (akış değişkeni değişmez enerji kapısı) | $U-L$ | $U-L$ | $\dot{T}_1 = \dot{T}_2 = \dot{T}_3$ |
| | $U-L$ | $U-L$ | $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V}_3 = 0$ |

Çizelge 1. Bağlaç diyagramı bileşenleri ve sınıflandırılması

6. teknik kongre

ni (ya da akış değişkeni) ile gösterilen birbirine ters yönde etkiyen bir "nedensellik" (causality) çiftine karşılık olarak düşünülebilir. Yani, eğer bu kapılardan birine bu değişkenlerden birisi etki ederse (giriş) o kapıda öteki değişkenin belirlediği bir karşıt etki (çıkış) elde edilir. Şekil 2a'da görülen yarım ok gücün A ve B kapıları arasında aktarılış yönünü göstermektedir. Şekil 2a'daki dik gösterilişe eşdeğer bir gösteriliş Şekil 2b'de görülmektedir. Bir kapıda nedenselliği göstermek üzere değişkenler Şekil 2c ve 2d'de görüldüğü gibi yönlendirilir. Bu yönlendirme güç yönlendirmesinden bağımsızdır. Değişken yönlendirmesi, her seferinde A ve B kapıları arasında ters yönlü iki ok çizilecek yerde, bağlaç çizgisinin, e değişkeninin yönüne karşı gelen ucuna dik küçük bir çizgi çekilerek gösterilebilir. Bu, aynı zamanda güç yönlendirmesinin de bir tek çizgide gösterilebilmesini sağlar. Şekil 3'de genel yapılı yalın bir bağlaç diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda Δf , fiziksel dizgedeki tekli enerji kapılarını (dizgenin etken ve edilgen bileşenlerini) ve B_{fc} , bu kapıların bağlı oldukları ikili ya da daha çoklu enerji kapılarını göstermektedir. Böylece B_c kapıları, fiziksel bileşenlerin ya dizi bağlı oldukları f iç değişkenleri ortak olan fiziksel çevreleri (circuit), ya da ko-

şut bağlı buldukları e uç değişkenleri ortak olan fiziksel düğümleri (node) göstermektedir. Eğer dizgede enerji aktarıcı ya da dönüştürücü nitelikte fiziksel bileşenler varsa bunlar yine By çoklu enerji kapıları olarak bağlaç diyagramında yer alırlar. Bu türden olan enerji aktarıcılar enerjiyi ya belli bir oranda yine aynı tür enerjiye dönüştürürler (dönüştürgeç, transformatör) ya da bir başka tür enerjiye dönüştürürler (topaç, jirator). Faytner [2] tarafından verilen tanımlara ve gösterilmelere uygun olarak, e-değişmez enerji kapıları "0", f-değişmez enerji kapıları "1", bağlaç dönüştürgeçler i "TR" ve bağlaç topaçları da "JR" ile gösterilirler. Elektriksel dizgelerden bilindiği gibi dönüştürgeç ve topaç enerjiyi belli bir orana göre bir uçtan ötekine aktarırlar. Eğer bu enerji aktarılışı başka bir enerji kapısı tarafından denetleneniyorsa "MTR" ya da "MJR" ile gösterilirler. Buradan anlaşıldığı gibi, bir bağlaç diyagramı, düğümleri enerji kapıları, bileşenleri de bağlaçlar olan bir doğrusal çizgedir. Bağlaç diyagramlarının da kendilerine özgü bir topolojisi kurulabilir [10]. Bu topolojinin, 0, 1, TR ve JR kapılarına göre e-f çarpımıyla verilen genelleştirilmiş güç bağıntılarından geliştirileceğini unutmamak gerekir. Bu iş, gerçekte elektrik devreleri kuramında topolojik durum denklemleri için yapılan genelleştirmenin bağlaç diyagramlarına uzanımı niteliğindedir. Kuvvet-gerilim türü fiziksel benzeşim ilkesinin benimsenmesiyle çeşitli fiziksel dizgeler için tek-kapılı bağlaç bileşenlerinin temel değişkenleri (nedensellikleri) Şekil 4'deki gibi sıralanabilir. Şekil 4'den görüldüğü gibi bağlaç bileşenleri çizgilerinin üstünde bulunan fiziksel değişkenler her zaman çaba değişkenlerini gösterirler ve birbirlerinin fiziksel benzeridirler. Böylece, v: elektriksel gerilim, F: mekanik öteleme kuvveti, T: mekanik dönme momenti, P: akışkan basıncı, T: ısı derecesi, A: kimyasal gerilim (afinite) değişkenleridir. Bağlaç çizgilerinin altında kalan fiziksel değişkenler de birbirinin fiziksel benzeri olup, i: elektrik akımı, V: mekanik öteleme hızı, u: mekanik dönme hareketindeki açısal hız, Q: debi (akışkanın birim zamanda geçen hacim değeri), S: entropi hızı, y: kimyasal tepkime (reaksiyon) hızı ya da kütle akışı gibi değişkenlerdir.

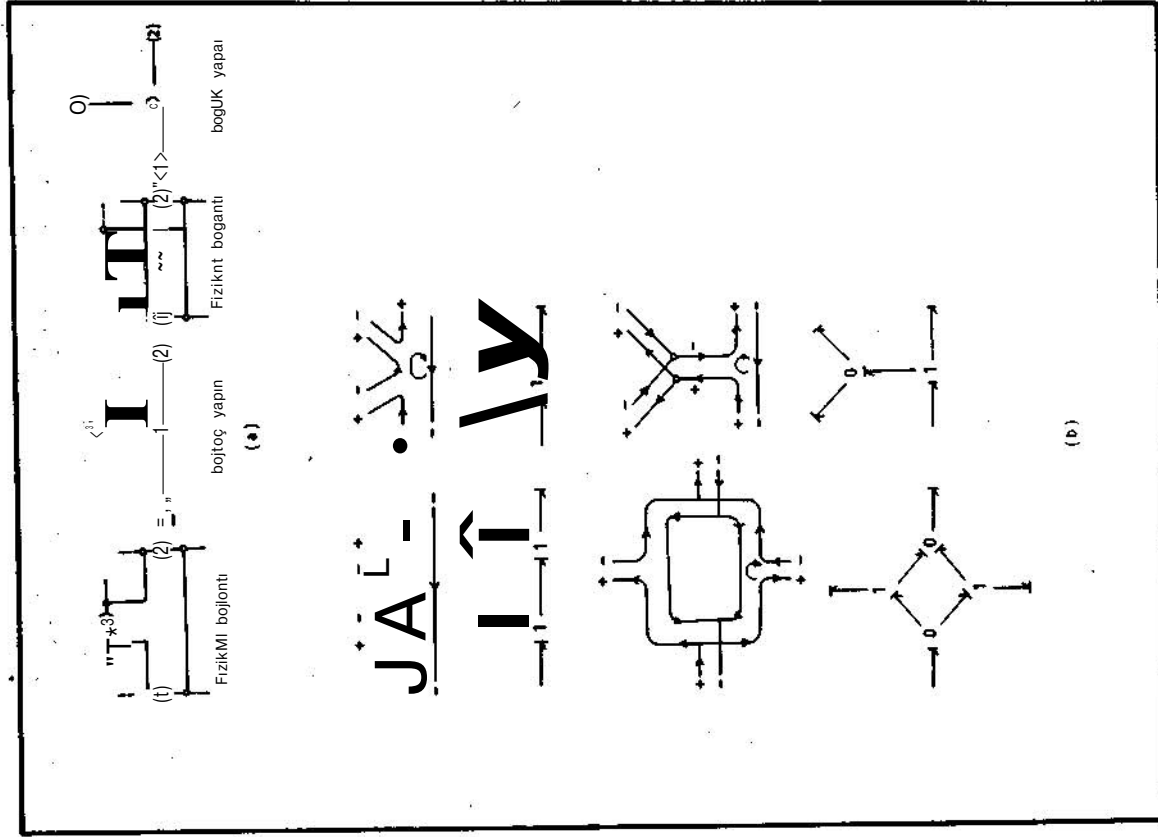
2.2 Bağlaç Diyagramlarının Kuruluşu

Tekli enerji kapılarında olduğu gibi ikili ya da çoklu-enerji kapıları Şekil 5'deki gibi modellenilebilir. Tekli ve çoklu enerji kapılı bağlaç bileşenlerinin yapısı Çizelge 1'de görüldüğü gibi bütün özellikleriyle sıralanabilirler.

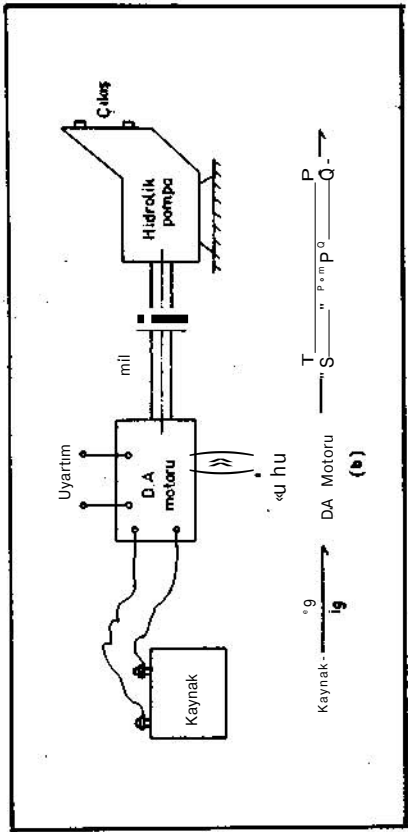
Bağlaç dönüştürgeçleri ve topaçlarının kullanılışlarını göstermek üzere Şekil 6'daki fiziksel dizgeyi örnek alalım. Burada görüldüğü gibi elektrik üreticinin verdiği enerji bir doğru akım motorunu çalıştırmakta ve bu motorun milinden alı-

| | |
|----------------|-------------------------------|
| $\frac{v}{1}$ | : elektrik, |
| $\frac{T}{u}$ | : mekanik dönme , hareketi |
| $\frac{T'}{S}$ | : ısı işlem, |
| $\frac{F}{V}$ | : mekanik öteleme hareketi |
| $\frac{P}{Q}$ | : akışkan hareketi |
| $\frac{A}{v}$ | : kimyasal işlem |

Şekil 4. Tek-kapılı bağlaç bileşenleri ve çeşitli dizge değişkenlerinin uç (çaba) ve iç (akış) değişkenleri olarak sınıflandırılması

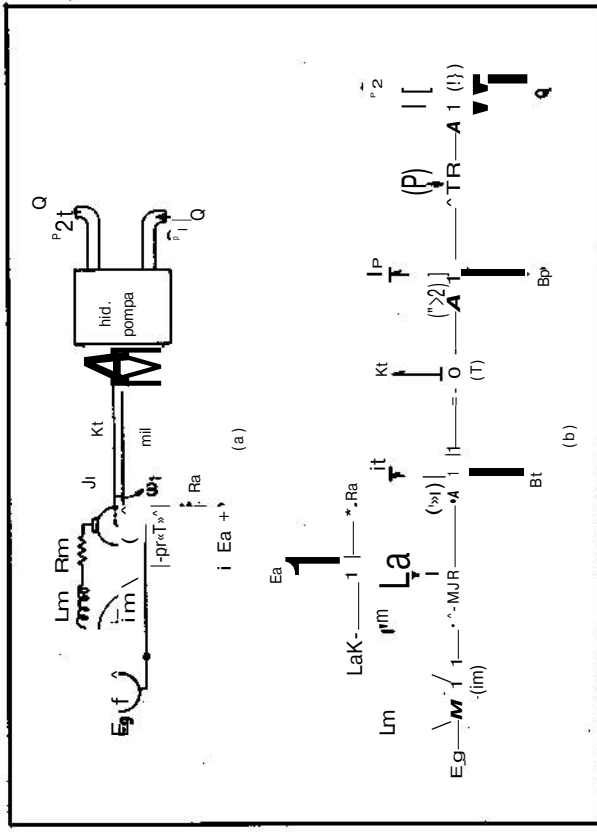


Şekil 5. a) 3-kapılı fiziksel bağlanmalar ve bağlaç modelleri
b) Çeşitli çok-kapılı bağlaç yapıları ve bağlaç yönlerinin belirlenmesi



Şekil 6. Bir fiziksel dizgenin bağlaç diyagramının kuruluşu

a) Gerçek dizge b) İkisel bağlaç diyagramı



Şekil 7. a) Karmaşık fiziksel yapıyı bir dizge bağlaç yönleri verilmiş bağlaç diyagramı
b) Karmaşık fiziksel yapıyı bir dizge bağlaç yönleri verilmiş bağlaç diyagramı

nan mekanik dönme enerjisi bir sivil pompayı çalıştırıp akışkanı basmaktadır. Bu yalın dizge için Şekil 6b'deki gibi bir ilkel bağlaç diyagramı çizilerek enerji kapıları ve bağlaç değişkenleri belirlenir. Bağlaç bileşenlerinin güç aktarılım yönleri bu örnekteki dizgede isteğe göre seçilemeyeceklerinden (görülen fiziksel durum nedeni) şekilde görüldüğü gibi seçilmelidir. Ancak geniş fiziksel yapıllı sistemlerin bağlaç diyagramlarında güç aktarılım yönlerinin 0,1, TR ve JR kapıları için seçimleri isteğe bağlı olarak yapılabilir. Bu sorun bağlaç bileşenlerinin topolojisi ile ilgilidir [10].

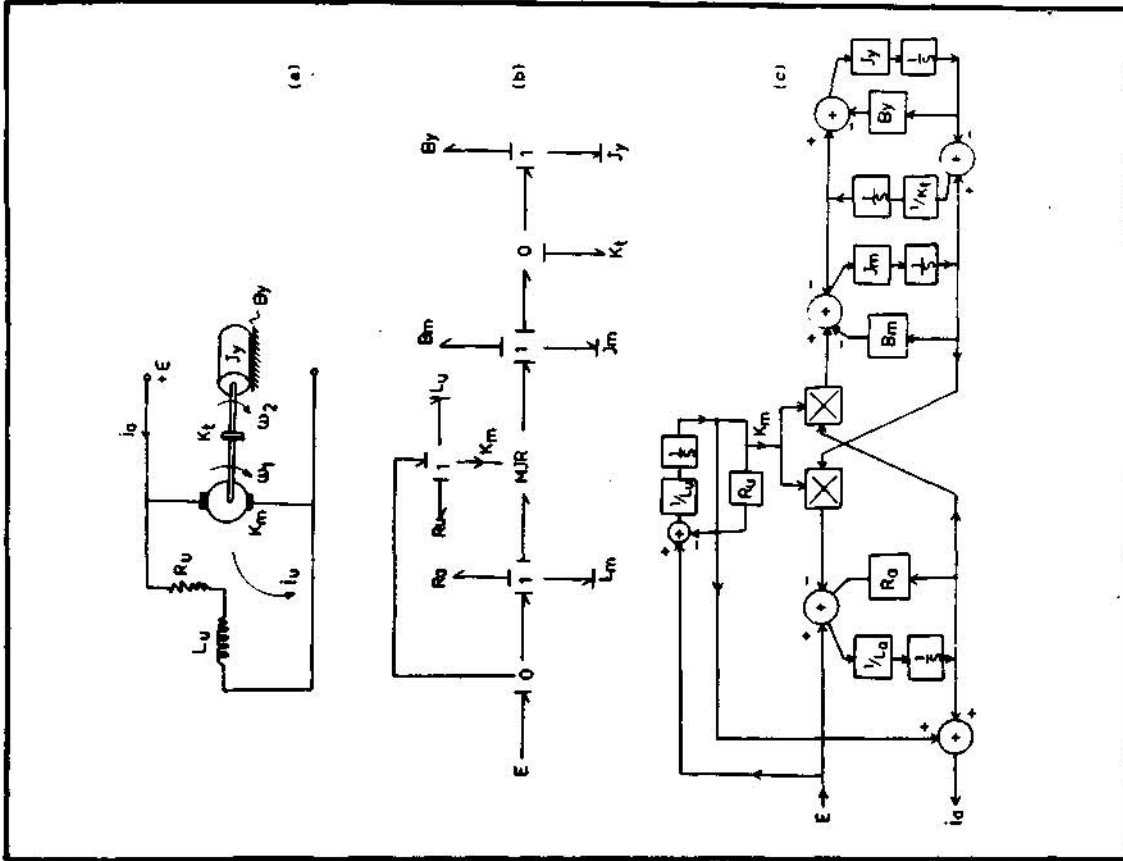
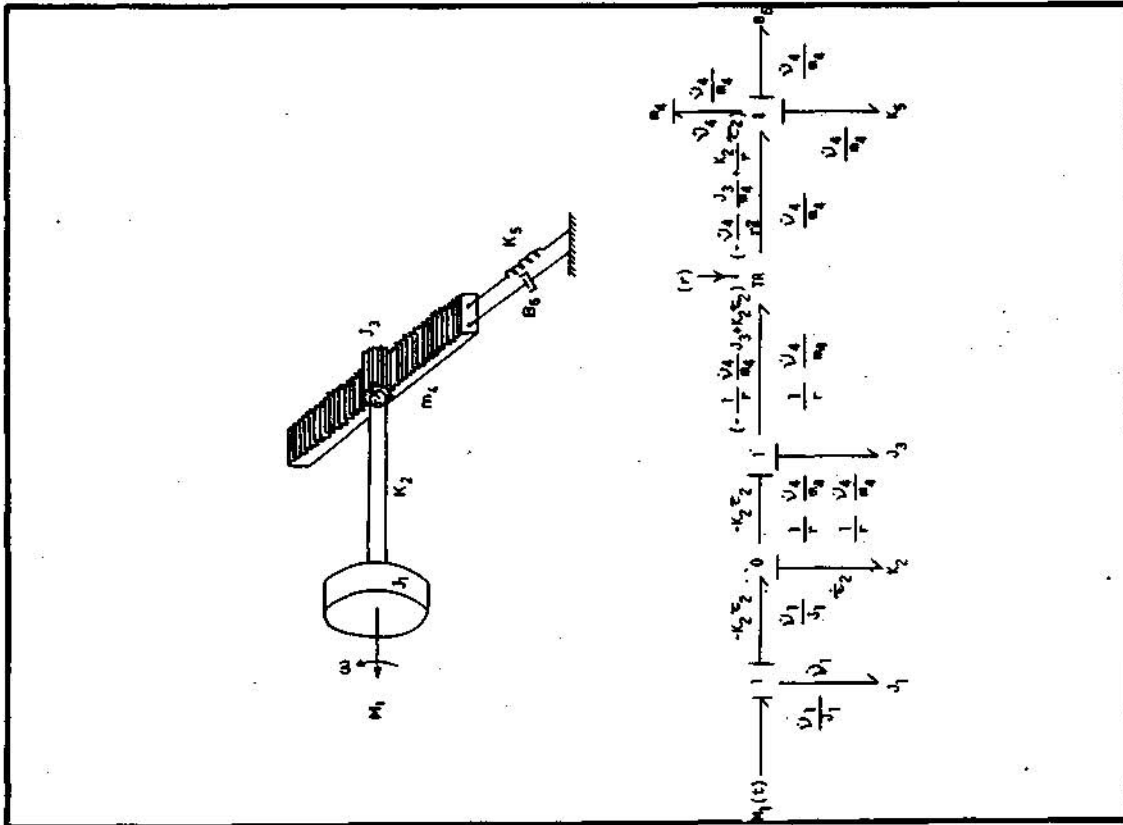
Şekil 6b'deki gibi kabaca çizilen bağlaç diyagramı, kaynak, DA motoru, mil ve sivil pompayı oluşturan fiziksel bileşenleri gözönüne alarak dizgenin enerji kapılarını gösterecek biçimde yeniden çizilebilir. Şekil 6a'daki dizge açık olarak çizilirse Şekil 7a'daki eşdeğer dizge elde edilir. Dizgenin enerji kapıları, % ve i_a akımlarının do-laştığı çevreler, ω ve ω_0 açısal hızlarının etki-lediği mekanik dönmeler, mildeki T dönme momenti ve Q debisinin etkilediği akışkan akışı olup fi-siksel bileşenler ve enerji dönüştürücüler göz önüne alınarak bağlaç diyagramı Şekil 7b'deki gi-bi kurulabilir. Buradan görüldüğü gibi 1 kapıları için akım, hız ve debi değişkenleri, 0 kapıları için moment değişkeni ortak değişken alınmıştır. Motor, alan akımı ile denetlenen bir topaç bağlaç ve pompa da, dönüşüm oranı pompa katsayısına eşit bir dönüştürgeç bağlaç ile gösterilmiştir. Burada L_f , L_a ve K_m , R_a motor devresinin indüktans ve dirençlerini, I_c , I_p ve B_p $p^{n_1} ve p^{n_2}$ eylemsizlik moment ve sürtünmelerini, K_t milin katı-lık katsayısını göstermektedir. E_a , E elektrik kaynakları, P_1 , P_2 pompanın akışkan girişi ve çı-kışındaki basınçları göstermektedir. Burada kuş-kusuz en önemli işlerden biri nedensellik dik çiz-giciklerinin belirlenmesidir. Bunun için hemen söylenmesi gereken, bu yönlendirmenin, enerji bi-riktiren fiziksel bileşenlerin nedensel değişken-lerinin durum değişkenlerini kullanabilecek bi-çimde seçilmiş olmalarıdır. Bu düşünce özellikle bağlaç diyagramlarıyla sistem modellerinin yasal (kanonik) modellerinin bulunmasında büyük rol oynar. Böylece, L, I ve K fiziksel bileşenlerinin ne-densellikleri bu amacı gerçeklemek için Şekil 7b'de görüldüğü gibi, R ve B lerin nedensellikleri de ilgili topolojik düşünceyi bütünleyici anlamda olmak üzere seçilmişlerdir [10]. MJR ve TR kapıla-rının nedensellikleri bağlı oldukları kapıların türüne göre (burada 1 kapısı durumu görülüyor) se-çilmiştir. Pompanın akışkan girişi bir akış kayna-ğı, çıkışı da basınç kaynağı gibi düşünülmüştür (kuşkusuz bunun tersi de düşünülebilir).

3. DIZGE DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLiŞİ : KANONİK DURUM BiÇİMİ

Bir bağlaç diyagramında, 0, 1, TR ve JR kapıları ile tek-kapılı dizge bileşenleri arasındaki güç

alış verişi denklemleri kolayca yazılabilir. An-cak 1 kapılarında f akış değişkenleri aynı kalaca-ğundan, bu kapılarda yalnız e çaba değişkenlerinin nedenselliklerini gözönüne alarak cebrik toplamı-nı; 0 kapılarında ise bu durumun tersi olacağından f akış değişkenlerinin cebrik toplamını yazmak ge-rekir. Bu iş, gerçekte, bağlaç diyagramlarının geometrisi yardımıyla yazılan Kirchhoff-Maxwell devre denklemlerinin fiziksel dizgeler için genel-leştirilmiş şeklidir. Mekanik, elektroteknik, a-kışkan ve ısı olayları birlikte alarak devinik dizgelerin yapısındaki davranışları bağdaştırdı-ğında bağlaç diyagramları yöntemine "genelleşti-rilmiş fiziksel devreler kuramı" gözüyle bakıla-bilir. Buna benzer bir yöntem önceleri Kron ta-rafından (1939-1945) düşünülmüş ve "diacoptic" yöntemi (yırtma yöntemi) geliştirilmişti. Bu yön-temin, ayrı ayrı enerji bölgeleri arasındaki ba-ğlantıları genel olarak açığa kavuşturamamış olması önemini yitirmesine neden olmuştur. Kron'un yolu, bağlaç diyagramı diliyle ancak 1,0 ve TR kapıla-rını kapsayabilecek kadar bir güç kazanabilmiş bir yöntem olarak kalmıştır. Kirchhoff-Maxwell teorisi ise ancak 1,0 kapılarını kapsayan bir bağ-laç yapısına karşılıktır. Oysa bağlaç diyagramları doğrusal durumda 1, 0, TR, JR ve genelleştirilmiş durumda da 1, 0, MTR ve MJR kapılarını bulunduran bir yapıyı içerdiğinden pek çok fiziksel diz-genin modellendirilebilmesinde güçlü bir yöntem olarak geliştirilmektedir.

Dizge denklemlerini durum değişkenleri kullanarak yazmak, en az sayıda enerji değişkeni kullanarak dizgenin matematik modelini bulabilme olanağını sağlar. Bu doğrudan doğruya bağlaç diyagramına ba-karak yapılabilir. Bunun için, çizilen bağlaç di-yagramı üzerinde, durum değişkenlerini verecek bi-çimde nedenselliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu iş, yine bağlaç bileşenlerinin 0, 1 kapılarının geometrisine uygun olarak doğrudan doğruya dizgeye bakarak sağlanır, örnek olarak Şekil 8a'daki diz-geyi alıp durum değişkenlerinin nedenselliklerini ve yine ve bunlara göre 1, 0 ve TR kapılarının uy-gun nedenselliklerini verelim. Bu durumda Şekil 8b'deki bağlaç diyagramı elde edilir. Bu bağlaç diyagramı, üzerinde gereken işlemler bitmiş olup, kanonik bir matematiksel model vermeğe uygundur. Bu yüzden böyle bir bağlaç diyagramını "kanonik bağlaç diyagramı" ya da "durum-bağlaç diyagramı" diye adlandırmak yerinde olacaktır. Şekil 8b'deki durum-bağlaç diyagramında enerji değişkenleri J_1 ve m , bileşenlerinin uç ve K_2 ve K_3 bileşenlerinin iç değişkenleri olduklarından, dizgenin bütün de-ğişkenleri bağlaç diyagramı üzerinde bütün birleş-tirici 1,0,TR kapılarının geometrik özellikleri gözönüne alınarak bunlar türünden işaretlenir. Yalnız burada j_3 bileşeninin durum değişkeni olma-dığını görmek gerekir. Bu, bir topolojik kesitle-me (cut-set) fiziksel akı depolayabilen enerji bileşenlerinden birinin durum değişkeni olması özelliğidir [11]. Böylece, durum-bağlaç diyagra-



Şekil 9. a) Fiziksel dizge; doğru akım şönt motoru
 b) Dizgenin yönlendirilmiş bağlaç diyagramı
 c) Dizgenin örneksel benzetimi

Şekil 6. Bağlaç diyagramlarıyla durum modeli elde edildiği.
 a. Bir mekanik dizge
 b. Dizgenin durum değişkenlerine göre yönlendirilmiş bağlaç diyagramı modeli

mına bakarak durum denklemleri VI, VH, T2, T5 durum değişkenleri türünden aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{v}_1 = -K_2 T_2 + M_1(t)$$

$$\dot{v}_4 = \frac{1}{r^2} \frac{J_3}{m^*} \dot{v}_4 - \frac{B_6}{m^*} v_4 + \frac{1}{r} K_2 T_2 = K_5 T_5$$

$$\dot{T}_2 = \frac{1}{J_1} v_1 - \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{m_1} v_4$$

$$\dot{T}_5 = \frac{1}{m_1} v_1 \quad (D)$$

Bu denklemlerin matris biçimde yazılmalarıyla $\dot{x} = A X + B u$ durum modeli elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_4 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_2 & 0 \\ 0 & \frac{B_6 r^2}{r^2 m_1 + J_3} & \frac{K_2 r m_1}{J_3 + r^2 m_1} & \frac{K_1 r^2 m_1}{J_3 + r^2 m_1} \\ \frac{1}{J_1} & -\frac{1}{r m_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_4 \\ T_2 \\ T_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} M_1(t)$$

$\dot{x} = A X + B U$

(1) denklemlerinden görüldüğü gibi, bağlaç diyagramlarından elde edilen durum denklemlerinde bir takım matris hesaplamaları ve dolayısıyla olabilecek işlem yanlışlıkları ortadan kaldırılmış olur. Ne var ki, bağlaç diyagramları tekniğini kullanmayı bir alışkanlık edinmek gerekmektedir, öte yandan, böyle bir alışkanlık bağlaç diyagramcıya, verilen bir karmaşık dizgenin herhangi bir matematiksel işlem yapmaksızın, doğrudan doğruya gözlem yoluyla adım adım bir durum-ışaret-akışı diyagramını bulabilme yeteneğini de kazandırır. Oysa durum denklemlerinin ışaret-akışı diyagramlarını gözlem yoluyla elde etmek yakın bir geçmişte bir takım araştırmacıları oldukça ilgilendirmiş olan bir konu idi [11,12].

4. BAĞLAÇ DİYAGRAMLARI İLE FİZİKSEL DİZGELERİN BENZETİMİ

4.1 Örneksel Bilgisayar Benzetimi

Bağlaç diyagramlarıyla fiziksel dizgelerin birleştirilmiş modelleri bulunduktan sonra, örneksel bilgisayar benzetimleri de yapılabilir. Gerçekten bir bağlaç bileşeni, Şekil 2'de görüldüğü gibi iki

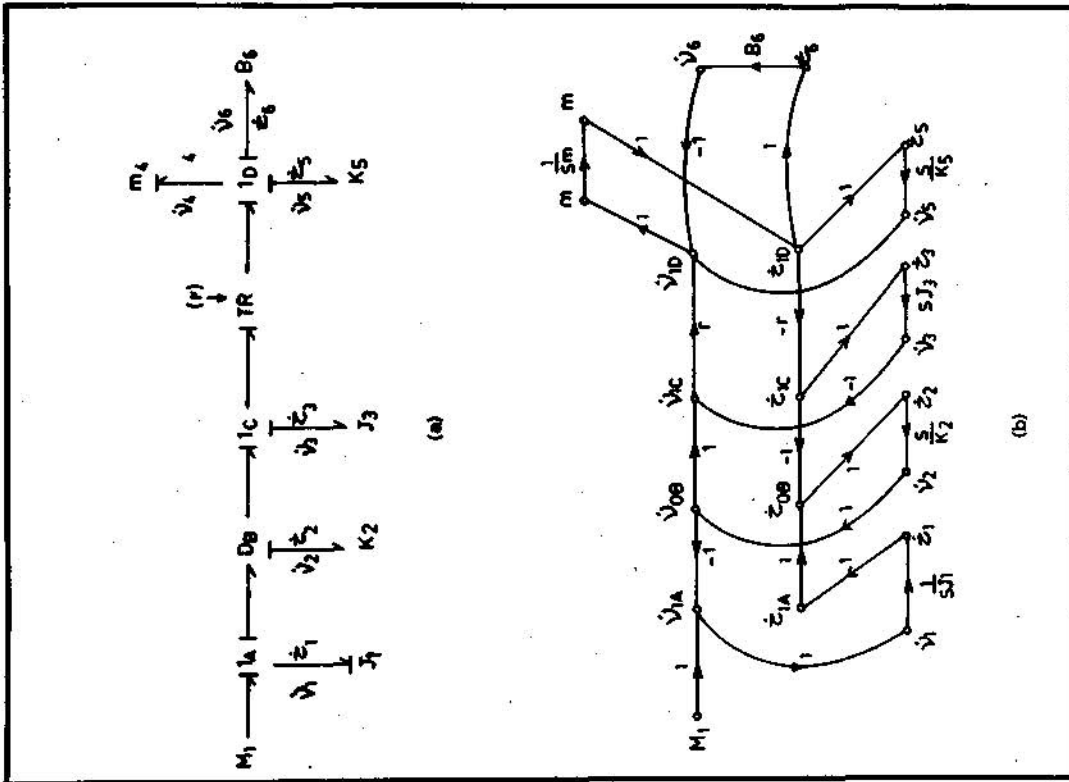
ışaretin gösterilişi olduğundan, enerji kapıları ve bu kapılara bağlanmış olan fiziksel bileşenler arasındaki enerji alışverişini kolayca göstermede yardımcı olur. Bu özellikler Şekil 5b ve 5c'den açıkça görülmekteyse de, bağlaç, akış ve öbek diyagramları arasındaki dönüşümler çeşitli enerji kapılarına göre Çizelge 2'deki gibi sıralanabilir. Genelleştirilmiş durumda TR ve JR iki-kapılıları başka enerji kapılarının değişkenleri ile denetlemiyorlarsa, bu bileşenlerin dönüşüm oranları ilgili kapının ortak değişkeninin birer işlevi olur. Bu özellik geribeslemeli denetim dizgeleri ve elektronik devrelerin incelenmesinde özellikle yararlı olur, «Basit bir örnek olmak üzere, Şekil 9'daki doğru akım şönt motorunu alalım. Önce dizgenin bağlaç diyagramı Şekil 9b'deki gibi doğrudan doğruya gözlem yolu ile çizilir ve bağlaç bileşenlerinin nedensellikleri verilir. Sonra da Çizelge 2'deki kurallara uygun olarak öbek diyagramının çizilmesine geçilir. Bu blok diyagram gerçekte bir örnek sel bilgisayar benzetim modelidir. Bağlaç bileşenlerinin nedensellikleri durum denklemlerini verecek biçimde seçilmiş olduklarından* bu benzetim bir durum modelini çözmek üzere kurulmuş olan örnek sel bilgisayar programlamasıdır.

4.2 Bağlaç Diyagramlarından İşaret-Akışı Diyagramlarına Geçiş

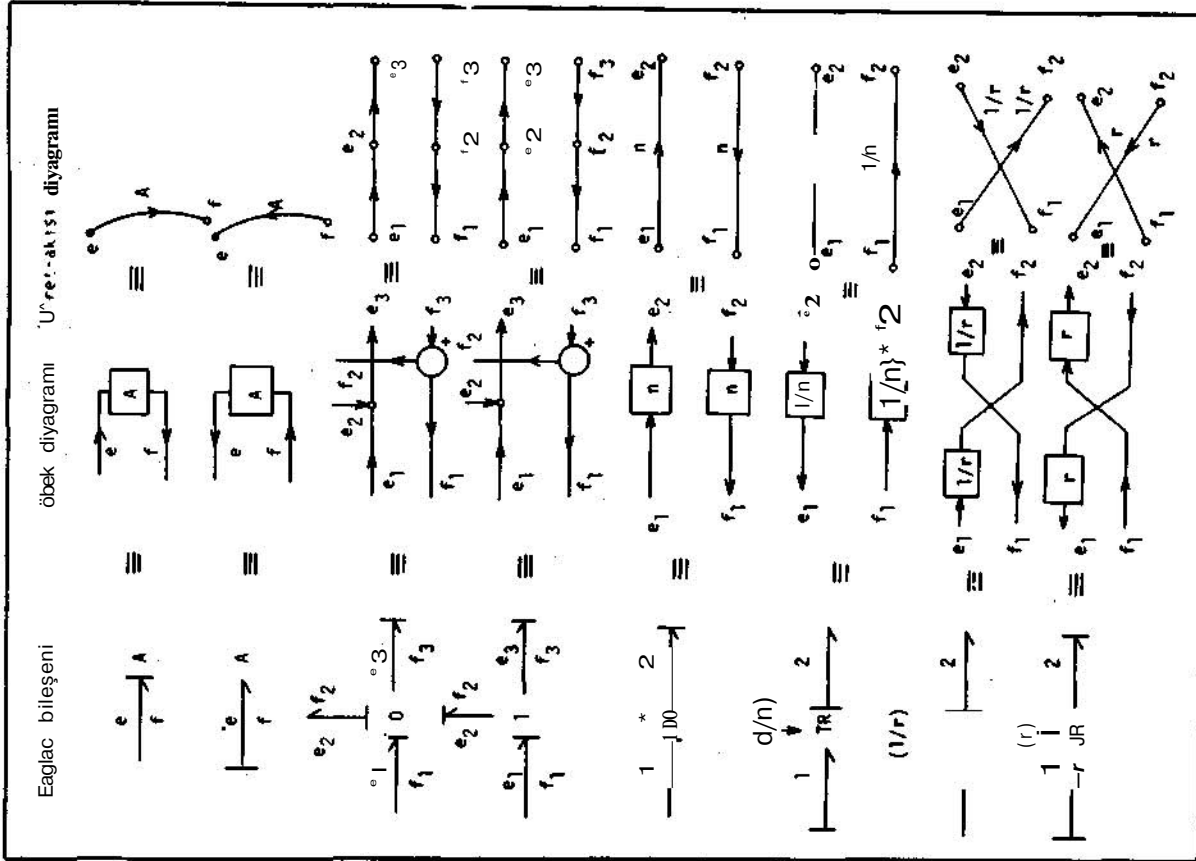
İşaret akışı diyagramları kullanarak doğrusal çok değişkenli dizgelerin model ve çözümlemesi, son on yılın modern mühendislik tekniğinin oldukça güçlü bir yöntemi durumuna gelmiştir. Ancak verilen bir dizgenin bu diyagramlarla geometrik olarak modelini kurabilmek yine birtakım çözümsel işlemlerle elde edilen çok değişkenli doğrusal cebrik denklemlerin uygun biçimlerde yazılmasını gerektirir. Oysa, ötedenberi ışaret-akışı diyagramları yöntemini kullananlar araştırdıkları dizge modelini doğrudan doğruya dizgeye bakarak bulma yollarını aramışlardır. Çizelge 2'den görüldüğü gibi, bağlaç diyagramları bu olanağı sağlar. Örneğin, Şekil 8'deki bağlaç diyagramının ışaret-akışı diyagramı dönüşüğü Şekil 10b'de görülmektedir. Bu dönüşüm, önce bütün enerji kapıları ikişer düğümle gösterilip, sonra diyagramdaki nedenselliklere göre akışlar bu düğümlerde toplanıp çıkartılarak elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE BAĞLAÇ DİYAGRAMLARI TEKNİĞİNİN ÖTEKİ UYGULAMA ALANLARI

Bu çalışmada, dizge biliminin ve denetim mühendisliğinin hemen en yeni tekniği olan ve özellikle verilen bir dizgenin matematiksel modelinin bulunmasında ve örnek sel bilgisayar benzetiminde pek elverişli olan bağlaç diyagramları kuramının özellikleri ve birtakım temel uygulamaları örnekler vererek açık bir dille incelenmiştir. Bağlaç diyagramlarıyla durum modellerinin bulunacağı 8-zel bir teknik verilmiş, öbek ve ışaret-akışı diyagramlarına dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 10. Bağlaç diyagramından işaret-akışı diyagramına geçiş
 a.- Şekil 8'deki dizgenin bağlaç diyagramının, işaret-akışı diyagramını dönüşümünü elde etmek üzere adlandırılmış
 b. İşaret-akışı diyagramı modeli



Çizelge 2.

Bağlaç diyagramlarının temel tanım ve özelliklerinden anlaşıldığına göre, dizgeleri bu yoldan çözümlenmek bir anlamda, "genelleştirilmiş bir devin ik dizgeler kuramı" geliştirmek demektir. Bu tekniğin, tek türden enerji domenleri için sınırlanmamış olması nedeniyle, mühendisliğin çeşitli dallarında, özellikle süreç denetim (process control) mühendisliğinde pek yararlı olacağı açıktır. Bağlaç diyagramlarının çağdaş dizgeler bilimi açısından en önemli özelliği durum değişkenleri tekniğinin en genel' durumlarda kullanabilme olanağını vermiş olmasıdır. Oysa, alışlagelen yöntemlerde böyle bir genelleme yapmak kolay değildir. Bağlaç diyagramları, çok değişkenli ve birçok değişik enerji domenli altyapıların doğrusal olan ya da olmayan bağlaşımları ile oluşan karmaşık yapıllı fiziksel dizgelerin çözümü için en genel bir yoldur. "Vektör-bağlaç" [10] kavramı tanımlanarak ve yine doğrusal olmayan durumlarda dizge bileşenlerinin enerji bağıntılarından yararlanarak yazılacak "diferansiyel-nedensellikler" tanımlarıyla [10] bu teoriyi genelleştirme olanakları araştırılmıştır. Bu işin Lagrange ve Hamilton devimbilimi ile birleştirilmesi, mühendislikte olduğu kadar fiziğin birçok dallarında da geometrik bir çözümlenme olanağı sağlayacaktır. Bağlaç diyagramları tekniğinin uygulamalı bilimlerde birçok alanlarda kullanılabilmesi söylenebilir. Bunlar arasında eriyik geçişim olayları (difüzyon) enzimler bilimi, kimyasal işlemler, ısıl işlemler, termodinamik çevrimlere göre çalışan bütün makineler [13] fizyolojik olaylar [14] biyokimya ve benzerleri gibi enerji alışverişi olaylarını içeren bütün doğal olaylar sayılabilir.

Doğrusal çizgiler kullanarak toplu parametrelili dizgeleri çözümlenmek her ne kadar bilinen bir yolsa- da bağlaç diyagramları tekniği bu yöntemlerin sınırlı oldukları bütün durumlarda çalıştığı gibi, bir çok matris/vektör işlemlerinin doğurabileceği güçlük ve yanlışlıkları da ortadan kaldırmaktadır. Ancak doğrusal çizgilerle bağlaç diyagramları arasındaki topolojik benzerlikler araştırılmağa değer bir konudur.

Bağlaç diyagramları çeşitli fiziksel dizgeleri bir arada tekilleştirebildiğinden bağlaç diyagramları tekniğine alışmış kimselerce pratik tasarım problemlerinde başarıyla kullanılabilir. Dizge yapısı karmaşık da olsa, bağlaç diyagramları 0,1,TR ve JR kapılarının geometrisinden yararlanarak çeşitli dizge işlevlerinin gözlem yoluyla hesaplanmasında kolaylık sağlar. Fakat bütün bunların yanında bağlaç diyagramlarının en üstün yanı bilgisayarla çözümlenmede araştırıcıya sağladığı yararlarıdır.

6. TEŞEKKÜR

Çalışmanın hazırlanması konusunda gerekli literatürü vermeyi lütfeden sayın Prof.Jean U.Thoma

(İsviçre), Prof.Dean Karnopp (California Univ.) ve birlikte çalıştığım sayın Prof.Henry M.Paynter (M.I.T.)'a burada teşekkür etmeyi bir görev sayarım. Ayrıca birçok verimli tartışmalarda bulunduğum eski öğrencilerim sayın Y.Müh.Kemal Altınışik ve sayın Y.Müh. İsa Kılıç'a teşekkürlerimi belirtmek isterim.

KAYNAKLAR

- [1] Shearer, J.L., A.T.Hutphy, H.H.Richardson s "introduction to System Dynamics", Addison-Wesley, 1967
- [2] Paynter, H.M. : "Analysis and Design of Engineering Systems", M.I.T. Press, 1961
- [3] Rosanierg, R.C. : "Computer-Aided Teaching of Dynamic System Behavior", Sc.D.Thesis, Dept.of Mech. Eng. M.I.T., Cambridge, Massachusetts, 1965
- [4] Karnopp, D.C., R.C.Rosenberg, : "Course Notes of Special Summer Course, 2.22s, Physical System Dynamics, M.I.T., Temmuz 1967
- [5] Thoma, j.u. s "Grundlagen and Anwendungen der Bonddiagramme", Verlag W.Girardet, Essen, 1974
- [6] Trans, ASME, : Jour.of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Spe.Iss.on 'Bond Graphs, Eylül 1972
- [7] Takahashi, Y., H.Rabins, D.M.Auslander, : "Control and Dynamic Systems", Addison-Wesley, 1970
- [8] Thoma Jean U. : "Bond Graphs for Thermal Energy Transport and Entropy Flow", Jour. Frank.Inst., Ağustos 1971, s.109-120
- [9] Altınışik, K. : "Termik Bir Santralin Matematik Modelinin Bağlaç Diyagramları Yöntemiyle Bulunması", Mak.Yük.Müh.Diploma Tezi, K.T.O., 1974
- [10] Şen, W. - "Dinamik Sistem Modellerinde Enerji Bağlaçları", Doçentlik Tezi, 1973
- [11] Şen, N. : "Genel Tipten Elektrik Devrelerinin Durum Denklemleri ve Çözümleri", 1.TÜBİTAK Bilim Kongresi Tebliği, 4-6 Ekim 1967 ve Bayındırlık İşleri Dergisi, Cilt 44, No:8-9 1968, s.32-38
- [12] Lago, G.V., R.H.Becker, J.E.Barbay, : "State Equations Formulations via Flow Graph Techniques", 6th Asilomar Conference on Circuits and Systems, Kasım 15-17, 1972, Pacific Grove, California
- [13] Hysten, G.J., R.E.Van-Sontag, : "Fundamentals of Classical Thermodynamics", J.Wiley, 1973
- [14] Riggs, D.S., : "Control Theory and Physiological Feedback Mechanisms", WWilliams and Wilkins Co., 1970