



BİLGİSAYAR GRAFİKLERİNDE KUMAŞ SİMÜLASYONU ÜZERİNE BİR İNCELEME AN EXAMINATION ON CLOTH SIMULATION IN COMPUTER GRAPHICS

DOI: 10.20854/bujse.1395032

Uğur Güven ADAR^{1,*}, Ediz ŞAYKOL²

Öz

Gerçek dünya nesneleri olan kumaş ve giysi gibi kavramların bilgisayar grafiklerinde gerçekçiliğini sağlayacak şekilde hızlıca modellenerek bir model üzerinde gerçek dünyada olduğu gibi katlanması, kırışması veya yayılması gibi durumların animasyonunun oluşturulması, günümüzde tam olarak çözülememiş bir konudur. Uzun yıllardır devam eden çalışmalar, üç boyutlu ortamdaki kumaş modellemesini hesaplama maliyeti ile gerçekçilik arasında kurulmaya çalışılan denge esasınca yürütülmektedir. Bu çalışmanın amacı, kumaş modelleme çalışmalarını tarihsel bağlamı da dikkate alacak şekilde incelemek ve kumaş modelleme çalışmalarının geleceğine dair bir projeksiyon oluşturmaktır. Bu doğrultuda, kumaşın fiziksel özellikleri ve oluşumu incelenerek tarihsel açıdan fiziksel ortamdan iki boyutlu ortama aktarılan kumaşın bilgisayar grafiklerindeki kullanımı bağlamında değerlendirilmektedir. Ardından, kumaş modellemesine ilişkin geçmişten günümüze kullanılan yaygın yöntemler incelenerek karşılaştırılmış; son olarak iplik düzeyinde kumaş modelleme ile homojen iplik düzeyinde kumaş modelleme ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve kumaş modelleme uygulamalarının geleceğine ilişkin bir değerlendirme yapılmıştır.

Abstract

The fast and accurate modeling of concepts like fabric and clothing, which are real-world objects, to achieve realism in computer graphics, allowing for simulations such as folding, wrinkling, or draping on a model as it would occur in the physical world, remains an unresolved issue in today's context. Long-standing research has been conducted in an attempt to strike a balance between the computational cost of modeling fabric in a three-dimensional environment and achieving realism. This study aims to examine fabric modeling endeavors in their historical context and project the future of fabric modeling efforts. In this regard, the physical properties and formation of fabric are investigated, evaluated in the context of its utilization in computer graphics where fabric is translated from the physical environment to the two-dimensional realm. Subsequently, prevalent methods used in fabric modeling from the past to the present are examined and compared. Finally, studies related to fabric modeling at the yarn level and homogeneous yarn-level fabric modeling are reviewed, culminating in an assessment of the prospects of fabric modeling applications.

Anahtar Kelimeler: Kumaş Simülasyonu, Giysi Simülasyonu, İplik Düzeyinde Kumaş Simülasyonu.

Keywords: Cloth Simulation, Garment Simulation, Yarn Based Cloth Simulation.

^{1,*} Corresponding Author: Istanbul Beykent University, Vocational School, Department of Computer Technologies, ugurguvenadar@beykent.edu.tr, orcid.org/0000-0003-3807-2176

² Istanbul Beykent University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering (EN), ediz.saykol@beykent.edu.tr, orcid.org/0000-0002-8950-5114

1. GİRİŞ

Gerçekçilik söz konusu olduğunda günlük hayatın içerisinde bulunan giysi, kumaş gibi nesnelerin bilgisayar ortamında modellenmesi ihtiyacı; film, animasyon, oyun, sanal/arttırılmış/karma gerçeklik ve moda tasarımı gibi alanlarda büyük ilgi görmekte ve önemli bir konu olarak kabul edilmektedir. Bu ilginin temel nedeni, gerek sanatsal faaliyetlerde gerekse moda tasarımında kullanıcılar açısından daha gerçekçi bir izlenim bırakabilmek ve kullanıcıların taleplerine mümkün olduğunca karşılık verebilmektir. Özellikle son dönemde hayatımıza giren Covid-19 pandemisi kaynaklı sağlık endişesi ve kullanıcıların güvenlik kaygıları nedeniyle bir mağazada kıyafet denemeden kıyafetin üzerlerinde nasıl duracağına dair fikir sahibi olabilmek önemli bir pazarlama stratejisine dönüşmüş durumdadır. Nitekim bu ihtiyaçlar doğrultusunda, mağazada kıyafetleri fiziksel olarak denemeye gerek kalmadan bir ekran üzerinde hızlıca denemeye olanak tanıyan TyrOn isimli bir teknoloji geliştirilmiştir (ul Haq ve Farooq, 2019). Bu sebeple bilgisayar grafikleri için bir kumaş modellemesi ele alındığında temelde dikkat edilecek husus kumaşın mühendislik ve teknik özellikleri değil, gerçekçi görünmesini sağlamaktır (Keiran vd., 2005). Ayrıca kumaş modelleme, kumaş yapılmadan önce performansının değerlendirmesine olanak tanınması açısından önemlidir. Özellikle astronomi ve itfaiye gibi kumaş performansının önemli olduğu alanlarda yapılacak modelleme, kumaşların geliştirilip deneyler aracılığıyla test edilmesi gibi zaman kayıplarının önüne geçmesi açısından oldukça önemlidir (Long vd., 2011).

Bilgisayar grafiklerinde kumaş modellemeye ilişkin çalışmalara bakıldığında, bunların genellikle iki grup altında toplandığı görülmektedir. Birinci grupta, tekstil sektörü yer almaktadır. Bu grupta makine mühendisliği bakış açısı kullanılmakta ve burada temel amaç kumaşın durumlarını tahmin etmek için doğru bir model geliştirme çabası bulunmaktadır. İkinci grup ise, ileri düzeyde bir kumaş modellemeye sahip olan bilgisayar grafik endüstrisidir. Bu grupta temel amaç, hesaplama maliyetlerini minimum düzeyde tutarak kumaşın en gerçekçi şekilde gösterilmesini sağlamaktır (Long vd., 2011).

Kumaş modelleme söz konusu olduğunda grafik fizikten önce gelmekte ve paralel programlama mimarisi öne çıkmaktadır. Kumaşın bir model üzerinde olması sürtünme, yer çekimi ve kalıp gibi esaslara bağlıken, modelin hareketi ile kırışıklık, akışkanlık, sönümlenme (damping) gibi hususlar önem arz etmektedir. Bunlar kumaşların birer durumu olarak kabul edilecek olursa, bu kumaş durumlarının bilgisayar ortamına aktarılması ve işlenmesi görece maliyetli olmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle, giysiyi tasarlamak için harcanan zaman ile kırışıklık, akışkanlık ve sönümlenme gibi çarpışma (collision) durumlarının işlenmesi (rendering) dikkate alındığında, giysinin gerçekçi davranışlarının işlenmesinin, zamanın büyük bir kısmını aldığına işaret etmekte ve bu zamanı azaltacak önerilerde bulunmak üzerine yoğunlaşmaktadırlar (Cirio vd. 2014). Bu bağlamda, kumaş modelleme çalışmaları, günümüzde hâlâ pratik bir çözüme kavuşmamış bir konu olarak (phenomenon) kabul edilebilir. Ancak buna rağmen konuya olan ilginin hâlâ canlı olması, çeşitli çalışmalar ile gelişme sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

Kumaş modelleme/simülasyon uygulamaları yaklaşımları, 1930'larda giysi geometrisi üzerine yapılan çalışmalarla (Pierce, 1937) başlamıştır. Kumaş modelleme, başlangıçta katı cisim (rigid body) üzerine doku haritalandırma (texture mapping) ile yapılırken günümüze değin çok çeşitli yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Nitekim bilgisayarların ve grafik kartlarının 1970'lerde yaygınlık kazanması, işlemci saat çevrimleri ve işlem kapasitelerinin artmasıyla grafik alanında yeni ve gerçekçi çalışmalar yapılmasının önünü açmış ve bu gelişmeler, kumaş modelleme

uygulamalarını ve yöntemlerini de geliştirmiştir. Bu yöntemlere ilişkin farklı sınıflandırmalar mevcuttur. Bunlardan biri; kumaş modellemeyi, geometrik temelli ve fizik temelli modeller olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Fizik temelli modeller; elastik temelli, parçacık temelli, kütle yay sönümleyici modeller olarak kendi içerisinde alt gruplara ayrılmaktadır (Kieran vd., 2005). Bir diğer sınıflandırmayı yapan Stuyck (2018) ise, bu yöntemleri uygulamalar bakımından çevrim içi ve çevrim dışı olarak gruplandırılarak alt gruplar özelinde ele almaktadır. Farklı sınıflandırmalar olmakla birlikte kumaş modellemede temel hedef, gerçek dünya görünümüne sahip giysi ve kumaşların zaman maliyetini minimum düzeyde tutacak şekilde optimum grafikler oluşturmaktır.

Son yıllarda, kumaş modellemesindeki gerçekçiliğin sağlanması amacıyla kumaşı doğrudan bir nesne olarak değil, kumaşı oluşturan ipliklerin davranışlarının modellenmesi ile daha gerçekçi ve hızlı simülasyonlar oluşturduklarını gösteren çalışmalar yapılmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalara iplik bazında modelleme denmektedir (Cirio vd. 2017). Çalışmalardaki ana hedef, kumaş modellemede karşılaşılan bükülme ve esneme gibi davranışların her bir iplikte vereceği tepkiyi modelleyerek daha gerçekçi modellemeler yapabilmektedir. Çünkü kumaşın ve kıyafetin fiziksel yapısı, bilgisayar ortamındaki modellemesiyle doğrudan bağlantılı olduğundan, kumaşı oluşturan etmenlerin fiziksel özelliklerinin detaylandırılması daha gerçekçi bir modelleme yapabilmek için önem kazanmaktadır. Ancak üç boyutlu ortamda oluşturan her iplik, bir nesne olarak kabul edilirse iplikler arasındaki davranışların ve kumaşı oluşturan binlerce ipliğin hesaplama maliyeti de her bir nesne için ayrıca ortaya çıkacağından bu tür bir modellemenin maliyeti de fazla olacaktır. Bu bağlamda, kumaşı oluşturan yapının örme veya dokuma kumaş olmasına göre değişmesi iplik düzeyinde modelleme ile doğrudan ilişkilidir (Sperl vd. 2020).

Bu çalışmanın amacı, kumaş modellemede kullanılan yöntemleri tarihsel bağlamını da dikkate alarak incelemek ve kumaş modelleme çalışmalarının geleceğine dair bir projeksiyon oluşturmaktır. Makale, kumaş modelleme çalışmalarına ilişkin gelişmelerin geçmişini ve geleceğini aynı perdede takip edebilmeye olanak tanınması ve kumaş modellemenin geleceğine ilişkin başlattığı tartışma ile bu konuda yapılan çalışmalara katkı niteliğindedir. Bu doğrultuda, öncelikle kumaşın fiziksel yapısı üzerine bir değerlendirme yapılmakta ve bilgisayar grafiklerinde kumaşın modellemesinde kullanılan yöntemler ele alınmaktadır. Bu bağlamda, çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, konuya ilişkin temel kapsamdan bahsedildikten sonra, ikinci bölümde, kumaşın fiziksel oluşumu genel hatlarıyla değerlendirilmektedir. Üçüncü bölümde, bilgisayar grafiklerindeki kumaş modelleme yöntemleri incelenmektedir. Dördüncü bölümde, kumaş modellemede gelecek vaadeden iplik düzeyinde kumaş modelleme yöntemleri incelenmektedir. Beşinci bölümde ise, bilgisayar grafiklerindeki kumaş modelleme çalışmalarının geleceği incelenmektedir.

2. FİZİKSEL ORTAMDA KUMAŞIN OLUŞUMU

Bilgisayar bilimlerinden farklı bir teknoloji olan tekstil teknolojilerinde bir kumaşın nasıl oluştuğunun bilinmesi, grafiksel ortama geçirilen kumaşın yapısının daha iyi analiz edilebilmesine olanak tanır. Benzer şekilde, fiziksel dünyadaki bir nesnenin bilgisayarlardan önce iki veya üç boyutlu ortama aktarılmasına genel bir bakış da modelleme konusunda fikir verebilir. Dolayısıyla kumaş modelleme çalışmalarına ilişkin incelemeye geçmeden önce kumaşın fiziksel ortamda nasıl oluştuğuna dair bilgi sahibi olmak konuyu daha iyi kavrayabilmek açısından önem kazanmaktadır. Kıyafetlerin üretimi, ipliklerin oluşturulması ile

başlamaktadır. İplikler, doğal lif veya sentetik lif olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Mutlu, 2011). En yaygın doğal iplik yapıları; yün, pamuk, ipek ve ketendir. Sentetik liflerde de polyester, poliyamid ve akrilik örnek olarak verilebilir (Çelikkan Aydoğdu ve Yılmaz, 2019). Bunların dışında, doğal lif üzerine sentetik kaplama yöntemiyle su geçirmez iplik yapıları da bulunmaktadır.

İpliği oluşturan yapıya elyaf denmektedir (MEB, 2011). Elyaf, liflerin bükülmesi ile oluşturulmaktadır. Liflerin fiziksel boyutunun yanında elyaf oluşturulurken ne kadar fazla lif bir araya gelirse, esneme katsayıları o oranda artmaktadır. Tekstil teknolojisinde bir ipliğin ne kadar esneyebildiği “Eğilme Dayanımı” (Bending Rate/Strenght) olarak adlandırılmaktadır (Naujokaitytė vd. 2007). İplikler bir araya getirilerek kumaş oluşmaktadır. Kumaşın oluşması için dokuma yapısı önem arz etmektedir. Bu dokuma yapısına “iplik bağlantısı” denilmektedir. Dokuma yapıları; Bezayağı, Dimi ve Saten Kumaş olarak üç grupta toplanmaktadır ve örne kumaş yöntemleri bunların dışında ve çok çeşitlidir (Yaşar, 2016).

Bir kumaşın rengi, fiziksel olarak iki şekilde elde edilebilir. Bunlar, ipliği boyamadan kumaş haline getirdikten sonra baskı veya boyama ile yapılan uygulama ve ipliği boyadıktan sonra kumaşın renkli halde olmasıdır. İpliği dokuyarak kumaş yapıldıktan sonra boyanması veya baskı ile renklendirilmesi işlemi, maliyet olarak ucuz olduğu için tercih edilmektedir. Gömlek gibi giysilerin ön yüzlerinin ve arka yüzlerinin bire bir aynı renkte olmamasının sebebi budur. İpliği boyadıktan sonra dokuma teknikleri ile kumaş yapma işleminde, iplik fiziksel rengini doğrudan içerisine batırılmış boya kazanından almakta ve ipliğin tamamı bu renkte olmaktadır. İpliklerin bir araya gelmesiyle kumaş oluşurken bir yandan da kumaşın rengini oluşturması dolayısıyla daha maliyetli bir süreç olduğundan sadece bazı firmalar tarafından tercih edilmektedir (Broadbent, 2001).

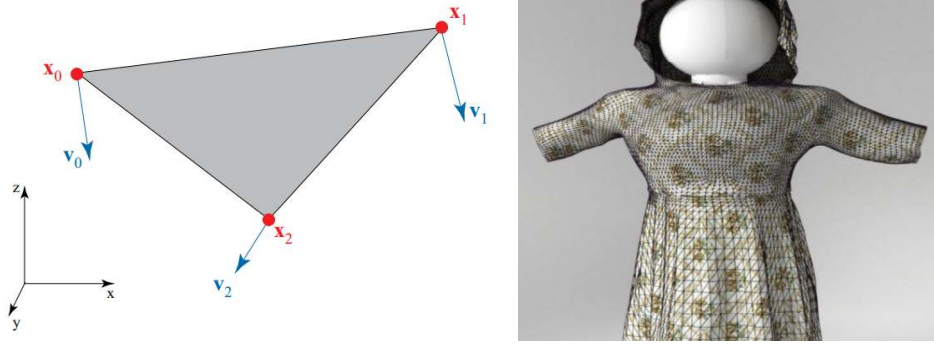
İplik veya kumaşın boyanmasında önemli diğer husus ise, boyanın kimyasal olmasının ipliği veya kumaşı etkilemesidir. Dolayısıyla renklendirme hususu, ipliğin ve dokumanın esnemesi gibi fiziksel özelliklerini doğrudan değiştirmektedir (Broadbent, 2001: 12). Bu duruma en basit örneklerinden biri, eskiden kumaşlara yapılan kolalama işlemidir. İplikler ham halde üretilirken ipliğin geldiği bölge, üretimi gibi hususlar da ipliğin yapısını ve ham rengini değiştirmektedir. Sentetik lifler, daha çok petrol türevidir olduğu için benzer renktedirler (Lord, 2003).

Bilgisayar grafikleri açısından incelendiğinde ipliğin kumaş elde edildikten sonra yapılan renklendirmesinin geometrik ve fiziksel modellerin bazılarında kullanıldığı görülmektedir. İpliğin bir nesne olarak boyanarak tasarlanması ise iplik düzeyinde kumaş (yarn level cloth) olarak düşünülebilir. Grafiksellemede, kütle yay sisteminin fiziksel karşılığı olabilecek ipliklerin esneme durumlarına bakıldığında yünün %25-%50 arasında (Hassan, 2018), pamuğun %8'e kadar (Salman ve diğ. 2016), ketenin ise %20'ye esneyebildiği görülmektedir.

Özetle; lifler bir araya gelerek ipliği, iplikler bir araya gelerek dokuma ile kumaşı oluşturmakta, kumaş kalıp tasarımı esasınca giysiyi oluşturmaktadır. Liflerin oranı, bükülme dereceleri ve sayısı ipliğin gerilme oranlarını değiştirmekte, dokuma ise kumaşın fiziksel davranışını değiştirmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde bilgisayar ortamında kumaşın bütünsel bir yapı ile ifade edilmesinin, modellemenin gerçekçiliğini azaltabileceği düşünülebilir.

3. KUMAŞ MODELLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Kumaş modellemede kullanılan yöntemler, geometrik ve fizik temelli modeller olarak ikiye ayrılabilir. Ancak bu yöntemlerin karışımı olan geometrik-fizik temelli modelleme sunan yöntemler de mevcuttur (Rudomin, 1990). Geometrik temelli modeller, kumaşın üç boyutlu düzlemde temsil edilmesi üzerinedir. Kumaşın üç boyutlu ortamda temsil edilmesinde genellikle üçgenlerin bir araya geldiği yapı ile kullanılır (Stucyk, 2022). Üçgen, kenarları oluşturan üç köşe (vertices) veya partikül ile birbirine bağlanarak oluşturulur. Üçgen tabanlı kumaş simülasyonunun gücü, ayrıştırmanın (discretization) hesaplama ihtiyaçlarına adapte edilebilmesi ve bununla birlikte kumaşın genel davranışını koruyabilmesidir (Casafranca ve diğ. 2020). Şekil 1 (a)'da üçgen yapısının özellikleri, (b)'de ise kumaş üzerinde gösterimi sunulmuştur.



Şekil 1: (a) Bir üçgen, konumları kırmızı renkte gösterilen üç partikül veya köşe noktasından oluşur (x_i). Parçacıkların hızları ise mavi renkte gösterilmiştir (v_i). (b) Kumaş üzerinde üçgenlerin yerleşimi (Stucyk, 2022).

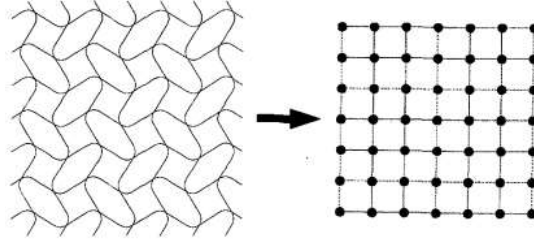
Fizik temelli modeller; elastik temelli modeller, partikül temelli modeller ve kütle yay sistemi üzerine yapılan modeller olmak üzere üç grup altında sıralanabilir. Geometrik temelli modeller, kumaşın fiziksel özelliklerinden bağımsız olarak giysiye benzer kıvrım ve kırışıklıkları geometrik olarak oluşturmayı hedeflemektedir. Fizik temelli modellerin temel yaklaşımı giysiyi ızgaralar, köşeleri (vertices) sonlu kütleyle sahip noktalar ve noktaların kuvvet ve enerjilerinin diğer noktalarla olan ilişkileri üzerinden hesaplanmasına dayanmaktadır. Burada potansiyel enerji germe (stretch), kesme (shear), bükme (bending) gibi deformasyonu göstermektedir (Li ve diğ. 2023).

Elastik temelli model, Weil (1986)'in iki boyutlu düzlemde üç boyutlu noktalar arasında enerji fonksiyonlarını tanımlayan bir modeldir. Bu modelde bulunan enerji; kumaşın çekme gerilimi, bükülmesi ve yer çekim bilgilerini içermektedir. Kumaştaki elastik kuvvetleri hesaplamak için noktalar arası mesafe ve bu mesafenin eğriliğinin ölçüsünü kullanmaktadır. Ancak bu modelde sadece asılı giysiler tasarlanmaktadır. Feynman tarafından yapılan benzer bir çalışmada (Feynman, 1986), giysinin nihai pozisyonu enerji minimizasyonundan türetilmiş olup Denklem (1)'de sunulmuştur.

$$E(P_{i,j}) = k_s E_{elastic(i,j)} + k_b E_{bending(i,j)} + k_g E_{gravitational(i,j)} \quad \text{Denklem(1)}$$

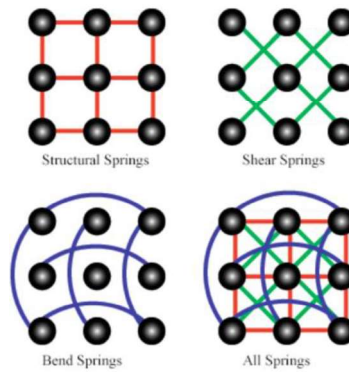
Partikül temelli model, 1992 yılında Breen vd. tarafından ortaya atılmıştır. Bu modelde, kumaşın altında yatan mekanik yapıyı temsil eden etkileşimli bir parçacık sistemi kullanarak

kumaş örtüsü simülasyonu için bir model geliştirmişlerdir. Parçacıklar, enerji fonksiyonlarıyla temsil edilen ilişkili mekanik bağlantıları tanımlayan denklemler kullanarak bitişik parçacıkları ve çevreleyen ortamla etkileşime girmekte olup, gevşeme yöntemi için stokastik gradyan iniş tekniği kullanmışlardır (Breen vd., 1992). Kullanılan yöntemdeki giysi yüzeyinin partiküllere dönüştürülmesi işlemi Şekil-2’de verilmiştir. Bu yönteme daha sonraları Eberhardt vd. (1996) tarafından genel diferansiyel denklemler eklenerek giysinin dinamik davranışının eklenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2: Kumaş/Giysiye ait dokumanın fiziksel özellikleri solda verilirken, sağda partiküllere dönüştürülmesi sunulmaktadır (Breen vd., 1992).

Kütle yay sistemi üzerine yapılan modeller ise, 1988-1998 yıllarında Haumann ve Parent (1988) tarafından sunulmuş olup 1995 yılında Provot (1995) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, birbirine bağlı parçacıklardan oluşan giysi modelinin ızgarası birbirine yaylı parçacıklarla bağlanmıştır. Kütle yay sisteminde; yapısal, çapraz, bükümlü yaylar ile bu üçünün karıştırılarak kurulduğu model yapıları, Newton’un ikinci hareket kanunu ile Hooke kanunu (bir yayın uzamasının uygulanan kuvvetle orantılı olması esas) kullanılarak yapılmakta olup Şekil-3’te verilmiştir (Kieran vd. 2005).



Şekil 3: Kütle yay modellemesinde kullanılan yay bağlantı çeşitleri (Kieran vd. 2005).

Kumaş modellemesi sürecinde örtük (implicit) ve açık (explicit) olarak iki temel hesaplama stratejisi bulunmaktadır. Buna integrasyon yöntemi denmektedir (Hayler ve diğ. 2004). Entegrasyon yöntemi, parçacıklardaki kuvvetleri, hızlarını ve konumlarını alır ve parçacığın bir sonraki hareket edeceği yeri ve hızını hesaplar (Baraff ve Witkin, 2023). Bu iki integrasyonun amacı da kumaşın t anından sonraki durumunu hesaplamak için kullanılmaktadır.

Açık integrasyon, hızlı olması sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu integrasyon yönteminde Euler integrasyonu veya Verlet integrasyonları kullanılabilir. Euler integrasyonu, $x^{n+1} = x^n + v^n(\Delta t)$ ve $v^{n+1} = v^n + a^n(\Delta t)$ olarak ifade edilmektedir. x^n , v^n , x^{n+1} , v^{n+1} sırasıyla partikülün mevcut konumu ve hızı ile yeni konumunu ve hızını temsil etmektedir. Δt zaman adımını, a^n ise parçacığın ivmesidir ve Newton’un hareket yasasını ($f^n = ma^n$) kullanarak

hesaplanır. Kumaş modellemede f^n parçacık üzerine etki eden birikmiş kuvvettir (Hayler ve diğ. 2004).

Verlet ise hesaplamasında partikülün hızını kullanmak yerine, yeni konumu hesaplamak için mevcut konum x^n ve önceki konumu x^{n-1} Denklem (2)'de verildiği şekliyle kullanır (Jakobsen, 2001).

$$x^{n+1} = 2x^n - x^{n-1} + a(\Delta t), \quad x^{n-1} = x^n \quad \text{Denklem(2)}$$

Örtük integrasyon ise 1998 yılında Baraff ve Witkin (Baraff ve Witkin, 1998)'de ortaya atılmıştır. Parçacık hakkında mevcut veya geçmiş bilgiyi kullanarak bir sonraki konumu ve hızı hesaplamak yerine, örtük integrasyon, bir sonraki konumu tahmin etmekte ve bu tahminin doğru olup olmadığını kontrol etmek için bir hesaplama yapar. Bu işlem, tahminin doğru olduğuna karar verilene kadar tekrarlanır (Hayler ve diğ., 2004). Choi ve diğerleri (Choi ve diğ. 2002) tarafından tanımlanan ikinci dereceden geri fark formülü (BDF; Bacward Difference Formula), yarı örtük bir integrasyon yöntemidir. BDF'de $\frac{\partial f}{\partial x}$ ve $\frac{\partial f}{\partial v}$ kısmi türevleri ile yaklaşık olarak hesaplanır. Eğer mevcut konum x^n sonuca eklenirse, elde edilen sonuçtan bir sonraki konum olan x^{n+1} elde edilir. Bir sonraki konumu kullanarak takip eden hız olan v^{n+1} hesaplanır. Denklem (3)'te hesaplama formülü gösterilmektedir (Hayler ve diğ. 2004).

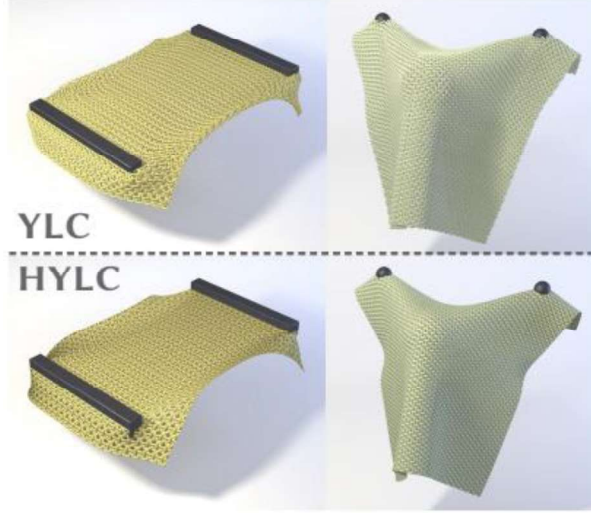
$$v^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} x^{n-1} - 2x^n + \frac{1}{2} x^{n+1} \right) \quad \text{Denklem(3)}$$

4. İPLİK DÜZEYİNDE KUMAŞ MODELLEME İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yukarıdaki bilgiler ışığında iplik düzeyinde giysi modelleme (yarn level cloth) üzerine çalışmalar incelenmiş ve iplik düzeyinde giysi modellemesinin rendering işleminin hesaplama maliyetinin çok yüksek olduğu görülmüştür. İplik seviyesinde kumaş modellemesi, tek tek ipliklerin davranışını modelleyen bir bilgisayar tabanlı simülasyonudur. Bu, ipliklerin gerilme, deformasyon ve birbirleriyle etkileşim gibi özelliklerini simüle etmeyi de içerebilir. Ayrıca kumaşların drapaj ve hareketini giydiğinde nasıl görüneceğini ve nasıl oturacağını da tahmin edebilir. İplik seviyesinde kumaş simülasyonu, moda ve tekstil sektöründe giysileri tasarlamak ve test etmek, ayrıca 3D grafik ve animasyon için gerçekçi kumaş simülasyonları oluşturmak için sıklıkla kullanılır (Kaldor, 2011). Bu tür bir simülasyon, bir giysinin giyildiğinde nasıl görüneceğini ve nasıl oturacağını tahmin etmek ve kumaş ya da tasarımda olası sorunları tespit etmek için yararlı olabilmektedir. Ayrıca, belirli performans özelliklerini elde etmek için kumaş özelliklerini ve tasarım elemanlarını optimize etmek için de kullanılabilir. Bu konuda en son yapılan çalışmalardan biri olan 2020 yılında Sperl vd. yapmış olduğu çalışma dikkat çekicidir. Sperl, bazı grafiksel gösterimlerden feragat ederek homojen bir iplik giysi modellemesi (homogenized yarn level cloth) önermektedir. Çalışmada, homojen olmayan modele göre çok daha hızlı olduğu sunulmuştur (Sperl vd. 2020).

İplik düzeyinde ve homojen iplik düzeyinde yapılan modellemelerin ikisi de kumaşların davranışını modelleyen bilgisayar tabanlı simülasyonlardır. İki tür arasındaki ana fark, simülasyonun hangi ayrıntı seviyesi ve tanecikli (granularity) ile gerçekleştirildiğidir. Homojen iplik seviyesi simülasyonu, kumaşı tek bir homojen varlık olarak modelleyen bir simülasyon türüdür. Bu tür bir simülasyonda, kumaş tek bir sürekli iplik olarak ele alınır ve kumaş içindeki tek tek iplikler açıkça modellenmez. Homojen iplik seviyesi simülasyonu, kumaşın genel davranışını analiz etmek için yararlı olabilir; ancak kumaş içinde meydana gelen ayrıntılı, iplik seviyesi etkileşimleri yakalayamayabilir. İki modelleme arasındaki fark değerlendirildiğinde

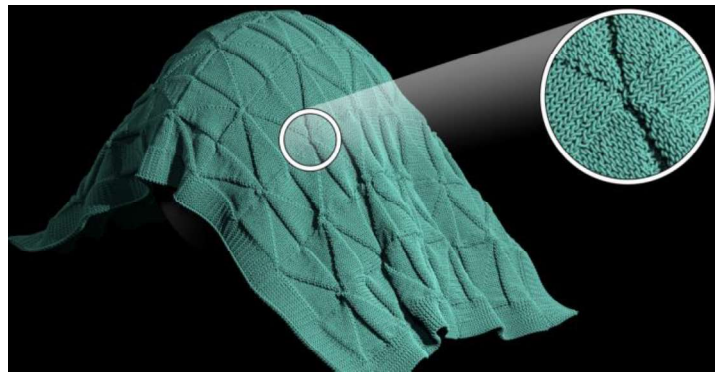
İplik seviyesi modelleme, kumaşın davranışının daha ayrıntılı ve doğru bir temsilini elde etmeyi sağlarken homojen iplik seviyesinde modelleme ise, daha basit ve soyut bir temsil sağlamaktadır. İki tür arasında yapılacak seçim, simülasyonun spesifik amaçlarına ve gereken ayrıntı ve doğruluğun seviyesine göre belirlenecektir. Homojen ve iplik düzeyinde modellemenin karşılaştırılması Şekil-4'te verilmiştir.



Şekil 4: Homojen ve İplik Düzeyinde Modelleme Karşılaştırılması. İplik Düzeyinde Modelleme (Üstte), Homojen İplik Modelleme (Altta) (Sperl vd. 2020).

İplik düzeyinde yapılan ilk çalışmalar, örme kumaşın davranışının ip dizilimini dokuma kumaştan ayırmayı temel almaktadır. Yapılan bir çalışmada (Kaldor vd., 2008) kumaşın bütününden çok, ipliklerin kendi arasındaki sürtünme ve esneme katsayıları hesaplanarak dinamik hareket içeren bir model sunulmuştur. Ancak iplik düzeyinde yapılan çalışmalarda hesaplama maliyetinin çok yüksek olması sebebiyle ardından gelen çalışmalar genellikle bu yöntemin hızlandırılması üzerinedir.

İplik düzeyinde modellemenin hızlandırılması için yapılan bir çalışmada (Kaldor vd. 2010), ipliklerin birbirileri ile olan ilişkisinin hesaplamasının çarpışma ve kırışma gibi durumlarda çok maliyetli olduğu belirtilmektedir. Bunun çözümü için cezaya dayalı (penalty based) bir yöntem önerilerek iplikler arası temaslar hesaplanmış ve deforme bazlı bir doğrusal kuvvetler esasınca değerlendirilmektedir. Yapılan testler sonucunda yedi ile dokuz kat hızlanma tespit edilmektedir. Şekil-5'te ilgili sonuç görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5: Cezaya Dayalı İplik Düzeyinde Modelleme (Kaldor vd. 2010).

Bu konuda yapılan çalışmalar, genellikle örme kumaş üzerine yoğunlaşmıştır. Örneğin ipliklerin örme kumaşta ayrıştırılarak geçişlerdeki teması ortadan kaldırarak yapılan bir çalışmada (Cirio vd. 2014), yüz binlerce ipliğin hızlı bir şekilde modellenenebildiği belirtilmektedir.

Homojen iplik düzeyinde modellemenin, iplik düzeyinde modellemeyi hızlandırma kategorisinde olduğu düşünülebilir. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada (Sperl vd. 2020), öncelikle ipliklerin kullanılarak kumaşın potansiyel enerji yoğunluğu hesaplanmaktadır. Daha sonrasında bu enerji yoğunluğu, ince kabuk simülasyonu ile kuvvet hesaplanmaktadır. İnce kabuk simülasyonu, kumaş gibi esnek malzemelerin mekanik davranışını incelemek için kullanılmakta ve bu malzemelerin çeşitli uygulamalarda performansını tasarlamak ve optimize etmek için kullanılabilir. İnce kabuk simülasyonu, farklı yükleme koşulları altında kumaşların deformasyon ve stres şekillerini analiz etmek ve olası sorunları ve iyileştirme alanlarını tespit etmek için kullanılabilir. Bu doğrultuda kumaşın sertliği oluşturulmaktadır. Bu yöntemde örme kumaşlarda esnekliği yüksek iplikler kullanılmaktadır. Bu ipliklerin özelliği, "anizotrop" (farklı ölçüm seviyelerinde farklı fiziksel özellikleri olan) olmasıdır. Bu çalışma ile kumaş modellemesi hızlandırılırken, gerçekçilikten ödün verilmiştir (Sperl vd. 2020).

5. KUMAŞ MODELLEMENİN GELECEĞİ

Milyon dolarlık bütçelere sahip animasyon filmlerine ve gerçekçi grafiklere sahip oyunlara günümüzde oldukça yüksek bir talep olması, gelecekte kumaş modellemede gerçekçiliğin sağlanmasındaki çalışmaların da hız kesmeden artacağını göstermektedir. İnsan hayatının günlük bir parçası olan bilgisayarlardaki en hızlı gelişen donanım parçasının ekran kartı olduğu düşünülürse yine günlük hayatın bir parçası olan kumaş ve giysinin modellenmesinin daha gerçekçi ve düşük hesaplama maliyetinde yöntemlere sahip olana kadar geliştirilmeye devam edileceği de öngörülebilir. Diğer yandan, gerçekçi grafikleriyle son günlerde dikkat çeken Unreal Engine 5'te dahi kumaş modellemesinin gerçekçi görünümü konusundaki soru işaretleri [Unreal Engine(a), 2023], kumaş modellemesinde kat edilmesi gereken uzun bir yol olduğunu göstermektedir.

Unreal Engine 5'te kullanılan bir kumaş modelleme aracı olan "*Chaos Cloth*", daha gerçekçi ve detaylı kumaş simülasyonları için olanak tanmaktadır. Bu araç, giysileri çalıştıran partikül modellemesinden sorumlu düşük seviyeli bir giysi çözücüsü olan *Chaos Solver*'i kullanır. Chaos Cloth Panel Düzenleyicisi, kumaş varlıklarını oluşturmak ve düzenlemek için kullanılır ve ardından çalışma zamanı kullanımı için kumaş fiziklerini simüle etmek için kullanılabilir. İş akışı, fizik kategorisinde bulunan yeni bir 'Kumaş Varlığı' oluşturmayı, ağırlık boyamalarını aktarmayı ve ardından kumaş fiziklerini simüle etmeyi içerir. Bununla birlikte, şu anda aracı nasıl kullanacaklarına dair resmî belgelendirme veya eğitici materyal bulunmamaktadır [Unreal Engine(b), 2023].

Özellikle moda tasarımı yazılımı endüstrisindeki gelişmeler dikkat çekmektedir. Gerçek zamanlı uygulamalar olarak adlandırılacak CLO, Blender, Maya nCloth gibi uygulamalar, gerçek zamanlı kıyafet tasarımında kumaş modellemesine olanak sağlamaktadır. Bu tür kumaş modelleme uygulamaları hesaplama maliyeti açısından pahalı örtük integrasyona ihtiyaç duymadan, parçacıkların konumlarını değiştirerek çalışmaktadır. Kumaşın davranışı da her t anında iteratif olarak çözümlenen bir dizi kısıt tarafından tanımlanır (Bender ve diğ. 2014). Bu yazılımların üretim ve tasarım sektöründe kullanılması, kumaş modellemeye ilginin artarak devam edeceğini göstermektedir.

Arttırılmış, sanal ve karmaşık gerçekçiliğin artmasıyla kullanıcıların avatar gibi kendilerini sanal ortamda yansıtmaya ihtiyaç duymasının da kumaş modellemedeki gelişmeleri tetikleyeceği düşünülebilir. Günümüzde emekleme aşamasında olan bu teknolojilerin, gelecekte nasıl bir forma dönüşeceğini öngörmek zor olsa da oluşturulacak sanal ortamların insanların isteyeceği gerçekçi forma dönüşmesinde beklentinin büyük olacağı öngörülebilir. Sanal gerçekçilikle kullanıcıların sanal görünülerinin oluşturulmasında kıyafet ve kumaşların gerçekçi görünülerinin sağlanması ve çeşitlendirilmesi, bu teknolojilerin kullanımlarını da arttırabilir. Örneğin Donglai Xiang'ın bir çalışması (Xiang, 2024), foto gerçekçi avatlardaki kumaş modellemesine odaklanarak bol giysilerdeki deformasyon hesaplamasının zorluklarını aşmak için önceden kaydedilmiş veriler ile sensörlerden alınan fiziksel verileri birleştiren bir çerçeve sunarak etek ve elbiselerin modellenme görünülerini iyileştirmeyi hedeflemiştir.

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin kumaş modelleme alanında yaygınlaşacağı da kaçınılmaz bir gerçektir. Özellikle derin öğrenme ve sinir ağları, kumaş modelleme gibi hesaplama maliyetini azaltma ve gerçekçiliği arttırma konusunda çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Örneğin Zhu ve arkadaşlarının çalışması, geri yayılım (backpropagation) sinir ağları regresyon modelini kullanarak daha verimli ve çarpışma hesaplama maliyetinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir (Zhu ve diğ. 2023). Benzer şekilde, Jin ve arkadaşları, sürekli çarpışma tespit algoritmalarını optimize etmek için derin sinir ağlarını kullanarak kumaş simülasyonlarının hızını ve doğruluğunu arttırmıştır (Jin ve diğ. 2024). Bu yöntem, geleneksel fizik tabanlı algoritmaların yerini alarak daha düşük maliyetli ve yüksek verimli simülasyonlar sağlamaktadır. Benzer şekilde, Mao ve arkadaşlarının çalışmasında derin öğrenme tabanlı bir yöntem önererek fiziksel tabanlı kumaş modellemesinde düğümlerin geometrik ve fiziksel özelliklerini tahmin etmeye çalışmaktadır (Mao ve diğ. 2023). Yapay zekâ tekniklerinin kumaş modellemede kullanılmasının bir diğer etkisinin de tekstil endüstrisi olduğu düşünülebilir. İlk dönemlerde tekstil sektörü kumaş modellemesine yön verirken, zaman içerisinde kumaş modellemesinin tekstil sektörüne yön vermesi muhtemeldir. Yimiao Wu'ya göre (Wu, 2023) yapay zekâ ve kumaş modellemesinin kalite kontrol, renk eşleştirme, tedarik zinciri yönetimi ve tasarım alanlarında devrim yaratmaktadır.

Gerçekçiliğin bilgisayar grafiklerinde oluşturulmasında, hesaplama maliyetini yazılımsal hız ve yöntemlerle azaltmaya çalışan araştırmacılar, donanımsal gelişmelerin ivme kazandırdığı grafik işleme yöntemlerine belki de geçici çözümler bulmaktadırlar. 1980'li yıllarda kumaş modellemenin ivme kazanmasını sağlayan bu konuda oluşturulan modelleme yöntemleri ise bir diğeri de donanımsal gelişmelerdir. Bu bağlamda, gelecekte kumaş modelleme açısından bakıldığında kuantum bilgisayarlarda bilgisayar grafiklerinin kullanılmasının da bugünden öngörülebilecek çalışmalarla (Lanzagorta ve Uhlmann, 2005) gelişebilecek bir yapıda olduğunu göstermektedir. Kuantum bilgisayarlar gibi DNA bilgisayarlar da kumaş modellemedeki ve bilgisayar grafiklerindeki kısıtlayıcı ve optimizasyon gerektirici hesaplama maliyetlerinden araştırmacıları kurtarabilir.

6. SONUÇ

Bilgisayar grafiklerinin amacının gerçek dünyanın yazılımsal ortamlara aktarılması olduğu düşünüldüğünde kumaşın fiziksel yapısının çeşitlilikleri ve farkları önem arz etmektedir. Bilgisayar grafiklerinde oluşturulan diğeri grafiksel nesnelere farklı olarak kumaş, sahip olduğu özellikler ve bu özelliklerin gösterilmesi bakımından diğeri nesnelere farklı olarak kumaş oluşturulan yapıtaşlarının özellik ve davranışlarının da gerçekçiliğe doğrudan etki

etmektedir. Kumaş yapısının animasyonu deniz, su birikintisi, kum ve bal gibi bir bütün arz eden modellemelere benzer gibi kabul edilse de özünde ciddi farklılıklar bulunmaktadır. İpliği oluşturan lifler, madde yapısı itibarıyla farklı esneme ve germe yapısını oluşturmakta, iplikler boyama tekniğine bağlı olarak yapılarına göre esneme katsayılarına sahip olabilmektedir. İplikler örme teknikleriyle farklı kumaş yapıları oluşturmakta, bu kumaş yapıları da kalıp teknikleriyle kesilerek çeşitli giysi modellerini oluşturmaktadır. Bu bağlamda incelendiğinde kumaş veya kıyafet modellemenin hesaplama maliyetinin günümüz bilgisayar teknolojisinde yüksek olacağı yadsınamaz bir gerçektir.

Renk ve gölgelemenin, kumaşın fiziksel olarak çeşitli yöntemlerle oluşturulmasından sonra kaplama vasıtasıyla yapıldığı düşünüldüğünde kumaş boyamanın, giysinin esneme, kırışma gibi davranışlarına etkisi olacağı öngörülebilir. Bu bağlamda yapılan çalışmaların bu kriteri dikkate almaması, gerçekçi modellemeden taviz vererek hesaplama maliyetini düşürme amacıyla olduğu düşünülebilir. Bu bağlamda; çalışmada elde edilen en önemli sonuçlardan biri, kumaş boyama ile ipliğin fiziksel yapısının ve esneme katsayılarının değişmesinin dikkate alınmasının kumaş modellemede “mükemmel gerçekçilik” kavramına ulaşmada bir basamak olacağı öngörüsüdür. Belki de resim sanatında olduğu gibi, 19. yüzyılda ortaya çıkan gerçekçilik-realizm akımından sonra gelen dışavurumculuk ve sürrealizm akımları gibi, kumaşın mükemmel gerçekçilikte modellenmesinden sonraki aşamaya geçmeden önceki son modelleme yöntemi, kumaş boyamasındaki değişikliklerin bilgisayar grafiklerindeki modele uygulanması olacaktır.

Bilgisayar grafiklerinde kullanılan temel kumaş modelleme yöntemlerinin ipliğin veya kumaşın fiziksel yapısının bir katı cisim olarak üç boyutlu ortamda formülize edilmesi olduğu görülmektedir. Partikül temelli modellemenin örme yapısını esas aldığı görülürken kütle yay sisteminin örme yapısındaki iplik gerilmesinden faydalandığı görülmektedir. Kumaş simülasyonunda istenen gerçekçiliğin sağlanabilmesi için elyaftan başlayan bir üç boyutlu nesne tasarımına ihtiyaç vardır. Ancak elyaflar bükülerek ipliği oluşturduğunda elyafın cinsi, bükülme sayısı ön işleminden tasarımsal geçişe ihtiyaç vardır. İpliklerin boyanması ve cinsi de benzer şekilde ipliğin gerilme katsayısını ve görünümünü etkilemektedir. Geleneksel bilgisayar grafikleri yaklaşımında, geometrik düzlemde (geometric pipeline) doku haritalama işlemi (texture mapping), nesnenin fiziksel yapısı oluşturulduktan sonra yapıldığı düşünülürse, kaplama eklenmesinin sonradan yapılması gerçekçiliği azalttığı düşünülebilmektedir. Özellikle kumaş modellemede sönümleme (damping) söz konusu olduğunda bu durum daha da önem kazanmaktadır. İplik, bağımsız bir nesne olduktan sonraki aşamada çeşitli örme türleri esasınca birbiri arasından geçerek düğümleri oluşturmaktadır. Bu düğüm yapısı esasınca bir ağırlık ve esneme oluşmaktadır. Bu bağlamda, yazılım dünyasının önemli bir elementi olan modülerlik kavramın kumaş modellemede daha titizlikle ele alınması gerçekçiliği arttıracaktır.

Bu çalışmada, öncelikle kumaş modellemesinin temel kavramları incelenmiştir. Ardından ilgili kumaş modellemesine ilişkin gerçek hayatta kumaşın ve giysinin elde edilmesi incelenmiştir. Kumaşın çeşitliliğinin üç boyutlu bilgisayar ortamına aktarılması esasınca yapılan bir teknik değerlendirilerek kumaş modellemesindeki gerçekçiliğin adımlarının neler olabileceği tasarlanmıştır. İplik bazlı çalışmaların gerçekçiliği arttırdığı gözlenmiş, ancak hesaplama maliyeti açısından sorunlar teşkil ettiği sonucu elde edilmiştir. Bu bağlamda, iplik düzeyindeki modelleme çalışmalarının ortaya atılmasından itibaren, gerçekçiliğin belirli bir seviyeye kadar oluşturulabileceği, ancak günümüz bilgisayar mimarilerinde kırışıklık, sönümleme ve gerilme durumlarının hızlı bir şekilde modellenmesinin mümkün olmadığı görülmüştür. Gerçekçilikten feragat ederek iplik düzeyinde modellemenin hızlandırılması bağlamında çeşitli çalışmalar

yapılmış ancak istenen seviyeye ulaşamadığı görülmüştür. Sonuç olarak kumaş modellemesinde iplik düzeyinden gidilmesinin daha doğru bir yaklaşım olacağı düşünülebilmektedir. Ancak hesaplama maliyeti açısından, literatürde yapılan yaklaşımların yetersiz olduğu, ipliklerin fiziksel özelliklerini ve animasyondaki davranışlarına iplik düzeyinde ancak bütünsel yaklaşılabilmesi öngörülmektedir. Dolayısıyla iplik düzeyindeki bir kumaş modellemesi ile kumaşın bütünsel geometrik yapısının bilgisayar grafiklerinde karıştırılarak kullanılmasının teoride hızlı ve gerçekçi olabileceği düşünülebilir.

7. KAYNAKÇA

- Baraff, D. ve Witkin, A. (1998). Large steps in cloth simulation. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 43–54). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3596711.3596792>
- Bender, J., Müller, M., Otaduy, M. A., Teschner, M. ve Macklin, M. (2014). A survey on position-based simulation methods in computer graphics. In *Computer graphics forum* (Vol. 33, No. 6, pp. 228-251). <https://doi.org/10.1111/cgf.12346>
- Breen, D. E., House, D. H. ve Getto, P. H. (1992). A physically-based particle model of woven cloth. *The Visual Computer*, 8(5), 264-277.
- Broadbent, A. D. (2001). Basic Principles of Textile Coloration. *Society of Dyers and Colourists Publication*.
- Casafranca, J. J., Cirio, G., Rodríguez, A., Miguel, E. ve Otaduy, M. A. (2020). Mixing yarns and triangles in cloth simulation. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 39, No. 2, pp. 101-110). <https://doi.org/10.1111/cgf.13915>
- Choi, K. J., ve Ko, H. S. (2005). Stable but responsive cloth. In ACM SIGGRAPH 2005 Courses (pp. 1-es). <https://doi.org/10.1145/1198555.1198571>
- Cirio, G., Lopez-Moreno, J. ve Otaduy, M. A. (2017). Yarn-level cloth simulation with sliding persistent contacts. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 23(2), 1152-1162. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2592908>
- Cirio, G., Lopez-Moreno, J., Miraut, D. ve Otaduy, M. A. (2014). Yarn-level simulation of woven cloth. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(6), 1-11. <https://doi.org/10.1145/2661229.2661279>
- Çelikkay Aydoğdu, S. H. ve Yılmaz, Demet (2019). Farklı Kılıf Lif Türü, İplik Numarası ve Öz Filament İnceliği Kullanılarak Üretilen Elastan İçerikli Özlü İpliklerin İplik ve Bazı Kumaş Özelliklerinin İncelenmesi. *Tekstil ve Mühendis*, 26(113), 2-13. <https://doi.org/10.7216/1300759920192611301>

- Eberhardt, B., Weber, A. ve Strasser, W. (1996). A Fast, Flexible Particle System Model for Cloth Draping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(5), 52–59. <https://doi.org/10.1109/38.536275>
- Feynman, C. R. (1986). Modeling the appearance of cloth (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Hassan, M. M. (2018). Wool fabrics coated with an anionic Bunte salt-terminated polyether: Physicomechanical properties, stain resistance, and dyeability. *Acs Omega*, 3(12), 17656-17667. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02040>
- Haumann, D. R. ve Parent, R. E. (1988). The behavioral test-bed: Obtaining complex behavior from simple rules. *The Visual Computer*, 4(6), 332-347. <https://doi.org/10.1007/BF01908878>
- Hayler, G., Bangay, S. ve Lobb, A. (2004). Implicit and Explicit Integration Methods in Cloth Simulation. Submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree Bachelor of Science (Honours) of Rhodes University, 7th November.
- Jakobsen, T. (2001). Advanced character physics. In Proceedings of Game Developer's Conference (San Jose, 2001). San Jose.
- Jin, Y., Shi, Z., Yang, J., Liu, Y., Qiao, X. ve Zhang, L. (2024). Deep Neural Network-Based Cloth Collision Detection Algorithm. *Scientific Programming*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/7889278>
- Kaldor, J. (2011). Simulating yarn-based cloth (Doctoral thesis). https://www.cs.cornell.edu/projects/YarnCloth/thesis_compressed.pdf
- Kaldor, J. M., James, D. L. ve Marschner, S. (2008). Simulating knitted cloth at the yarn level. In SIGGRAPH '08: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference 65 (pp. 1-9), Association for Computing Machinery, New York, US. <https://doi.org/10.1145/1399504.1360664>.
- Kaldor, J. M., James, D. L. ve Marschner, S. (2010). Efficient yarn-based cloth with adaptive contact linearization. *ACM Transaction on Graphics*, 29(4), 1-10. <https://doi.org/10.1145/1778765.1778842>.
- Kieran, E., Harrison, G. ve Openshaw, L. (2005). Cloth simulation. MSc Computer Animation, NCCA Bournemouth University, 47-61.
- Lanzagorta, M. ve Uhlmann, J. K. (2005). Hybrid quantum-classical computing with applications to computer graphics. In ACM SIGGRAPH 2005 Courses (pp. 2-es). <https://doi.org/10.1145/1198555.1198723>

- Li, X., Li, X. R., Li, Y. ve Feng, W. (2023). Review of cloth modeling and simulation for virtual fitting. *Textile Research Journal*, 93(7-8), 1699-1711. <https://doi.org/10.1177/00405175221135625>
- Long, J., Burns, K. ve Yang, J. J. (2011, July). Cloth Modeling and Simulation: A Literature Survey, Digital Human Modeling-Third International Conference, ICDHM, Orlando, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21799-9_35
- Lord, P. R. (2003). Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics, Woodhead Publishing. ISBN: 1855738651, 9781855738652
- Mao, M., Va, H., Lee, A. ve Hong, M. (2023). Supervised Video Cloth Simulation: Exploring Softness and Stiffness Variations on Fabric Types Using Deep Learning. *Applied Sciences*, 13(17), 9505. <https://doi.org/10.3390/app13179505>
- MEB (2011). Tekstil Teknolojisi: Filament İplik Üretimi. TC. Milli Eğitim Bakanlığı Yayını, Ankara.
- Mutlu, S. (2011). Jüt Lifi ve Tekstil-Hazır Giyim Sektöründe Kullanım Alanları. *Akdeniz Sanat*, 4(8), 103-105.
- Naujokaitytė, L., Strazdienė, E. ve Fridrichova, L. (2007). Comparative Analysis of Fabrics' Bending Behavior Testing Methods. *Tekstil: Journal of Textile and Clothing Technology*, 56(6), 350-357.
- Pierce F. T. (1937) On the Geometry of Cloth Structure. In Journal of the Textile Institute, 28: T45 – T97. <https://doi.org/10.1080/19447014908664605>
- Provot, X. (1995). Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. In Graphics interface (pp. 147-147). Canadian Information Processing Society. https://www.cs.rpi.edu/cutler/classes/advancedgraphics/S14/papers/provot_cloth_simulation_96.pdf
- Rudomin, I. J. (1990). Simulating cloth using a mixed geometric-physical method. University of Pennsylvania. https://www.researchgate.net/publication/35515171_Simulating_cloth_using_a_mixed_geometric-physical_method
- Salman, A. A., Saleh, S. S., Sharkas, M. ve Sakr, E. M. (2016). Bending properties of cotton fabrics produced from different spinning methods. *Journal of Scientific Research in Science*, 33(part1), 337-358. <https://doi.org/10.21608/jsrs.2016.15311>
- Sperl, G., Narain, R. ve Wojtan, C. (2020). Homogenized yarn-level cloth. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 39(4), 48-1. <https://doi.org/10.1145/3386569.3392412>

- Stuyck, T. (2018). Cloth simulation for computer graphics. *Synthesis Lectures on Visual Computing: Computer Graphics, Animation, Computational Photography, and Imaging*, 10(3), 1-121. <https://doi.org/10.2200/S00867ED1V01Y201807VCP032>
- Stuyck, T. (2022). Cloth simulation for computer graphics. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02597-6>
- Ul Haq, I. ve Farooq, A. M. (2019). TryOn: An Augmented Reality Fitting Room. In *Mobile Devices and Smart Gadgets in Human Rights*, (pp. 98-131), IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-6939-8.ch005>
- Unreal Engine(a). (2023). Clothing Tool. Unreal Engine. <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/clothing-tool-in-unreal-engine/>
- Unreal Engine(b). (2023). Chaos Cloth Tool Overview. Unreal Engine. <https://dev.epicgames.com/community/learning/tutorials/OPM3/unreal-engine-chaos-cloth-tool-overview>
- Weil, J. (1986). The synthesis of cloth objects. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20(4), 49-54. <https://doi.org/10.1145/15886.15891>
- Wu, Y. (2024). How AI is leading the textile industry to a new lease on life. AMT Lab @ CMU. <https://amt-lab.org/blog/2024/1/how-ai-is-leading-the-textile-industry-to-a-new-lease-on-life>
- Xiang, D. (2023). Modeling Dynamic Clothing for Data-Driven Photorealistic Avatars. In *SIGGRAPH Asia 2023 Doctoral Consortium* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1145/3623053.3623373>
- Yaşar, N. (2016). Dokuma Kumaşlarda İplik Özelliklerinin Giysi Form ve Görünümlerine Etkileri. *Yedi*, (15), 173-184. <https://doi.org/10.17484/yedi.85625>
- Zhu, H., Gao, Z. ve Xu, L. (2023, November). Cloth simulation based on neural network regression. In *2023 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML)* (pp. 658-664). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICML60161.2023.10424751>

