

Bitki Hücre Çeper Selülozunun Fibriler ve Kristalin Yapısı*

Gülseren YAZICIOĞLU

Prof.Dr.

Ege Üni. Müh.Fak. Tekstil Müh. Bölümü İZMİR

Bitki hücresine şekil ve desteklik veren çeper selülozunun yapısı, pamuk, keten v.b. pekçok bitkisel lifin esasını teşkil etmesi bakımından tekstilin de konusu olmuştur. Selülozun, kristalin ve fibriler yapısı üzerinde bugüne kadar pekçok araştırma yapılmıştır. Bu yazıda hücre çeper selülozunun oluşumu, kristalin ve fibriler yapısı üzerindeki araştırmalar anlatılmıştır.

FIBRILLER AND CRYSTALLINE STRUCTURE OF PLANT CELL WALL CELLULOSE

Since it is a basic component of many plant fibers such as cotton, linen... etc. plant cell wall cellulose is also a research topic for textiles. Investigations have proved that cell wall cellulose has a fibrillar and crystalline structure. In this article, researches on the formation and fibrillar and crystalline structure of the plant cell-wall cellulose are conveyed.

1. GİRİŞ

Genel olarak bitki hücreleri sitoplazmadan farklı karakterde olan bir çeperle çevrilidir. Sadece yeşil algler, bazı fungusların serbest hareket eden zoosporları ile yüksek bitkilerin cinsel üreme hücreleri v.b. gibi bazı hücrelerde çeper bulunmayabilir. Fakat örnekten de anlaşılabilir gibi çepersiz bitki hücrelerine ancak tek hücre gibi primitif canlılarda rastlamak mümkündür. O halde gelişmiş bitkilerin pekçok hücreleri çeperlidir ve bitkisel lif hücreleri de çeperle çevrilidir.

Bitki hücresine şekil ve desteklik veren bu çeperin kimyasal ve fiziksel yapısı ile mikroskopik görünüşü pek çok araştırmacıya konu teşkil etmiştir. Özellikle pamuk, keten, rami v.b gibi bitkisel lifler tekstilin önemli hammaddeleri olduklarından bu konular tekstille uğraşanların daima ilgisini çekmiştir. Kuşkusuz, genel ola-

*Bu yazı, dergimizin 35 nolu Ekim 1992 sayısının 268-275 numaralı sayfalarında yer alan yazının görülen lüzum üzerine yeniden düzenlenmiş biçimidir.

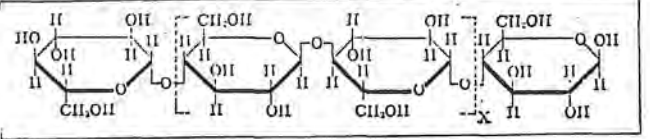
rak, büyük miktarlarda üretimi yapılan hammaddelerin hatasız bir şekilde işlenmeleri, o maddenin yapısını en ince ayrıntısına kadar bilmekle mümkündür. Eğer herhangi bir işlem bir hammaddeye, yapısı bilinmeden, gerektiği gibi uygulanmıyorsa önemli kayıplar vermeden işlenen maddeyi normal haline yeniden dönüştürmek çoğu zaman mümkün değildir. O halde giyim, çevre eşyası ve teknik alanlarda hala en geniş ve en uygun kullanım yerini muhafaza etmekte olan bitkisel liflerin esasını teşkil eden hücre çeperinin her yanı ile incelenmesi temel bilimleri olduğu kadar tekstille ilgilenenleri de meşgul etmektedir. O bakımdan "bitki hücre çeperi" konusu temel bilimlere dayalı endüstriyel, ekonomik özellik taşıması ile günümüzde de hala önemini korumaktadır.

2. SELÜLOZUN TABİATTA MEYDANA GELİŞİNİN KISA AÇIKLAMASI

Selülozun tabiatta bitki hücre çeperinde meydana gelişindeki mekanizma üzerinde pekçok araştırma yapılmış ve karbonhidrat oluşum mekanizmasından hareketle selülozun meydana gelişini açıklanmaya çalışılmıştır.

Günümüzde, kesin olarak, bitkilerde karbonhidratların oluşumunun fotosenteze dayandığı bilinmektedir. Fotosentez olayında kök sistemleriyle alınan suyun havadan alınan karbondioksit ile bitkilerin klorofili ve güneş enerjisinin etkisi sayesinde birleşmesi olayı araştırmacıları uzun yıllar meşgul etmiştir. Çok sayıda araştırmacı tarafından, karbonhidrat oluşumuna kadar değişik ana ürünler meydana geldiğine dair değişik fikirler ileri sürülmüştür. Sonuç olarak araştırmalar, karbondioksidin bağlanmasının devresel reaksiyonlar zinciri içinde tamamlandığını ortaya koymuştur. Tıpkı bir fabrikanın çeşitli kolonlarda işletilen farklı çarklarının çalışıp sonuçta ilksel maddelerden belli kompleks ürünlerin üretilmesi gibi [Vardar ve Güven 1990]. Açıklaması çok uzun sürmüş ve hala da gizlilikleri bulunan fotosentez olayında ilk ürün olarak önceleri formaldehitin meydana geldiği, bundan glukozun oluştuğu uzun yıllar kabul edilmişti. Ancak fotosentez olayında glukoz ulaşmaya kadar meydana gelen ürünler üzerinde yapılan uzun araştırmalar göstermiştir ki fotosentezde meydana gelen ilk kararlı ürün fosfoglisarik asit (PGA)'dir. Bu durum kesinlikle saptanmıştır. Fakat fosfoglisarik asit daha sonra indirgenerek 3 C lu indirgen bir şeker (trioz) olan fosfogliseraldehit (PGA1) meydana gelmektedir. Fotosentez olayında CO₂ bağlanma ve indirgenmesinde çember Calvin tarafından açıklanmıştır. Şekil 1 de Calvin çemberi reaksiyonlarının genel şeması görülmektedir [Weisz ve Fuller, 1962].

ta α ve β glukoz ve formunda bulunmaktadır. Selülozun oluşumunda β glukoz rol oynamaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, tabiatta selüloz anhidrobeta glukoz ünitelerinin kondanzasyonu ile oluşmaktadır. Yan ürün olarak da su açığa çıkar.



Şekil 3. Anhidrobeta glukoz molekülleriyle oluşan selüloz zinciri [Scherer, 1954]

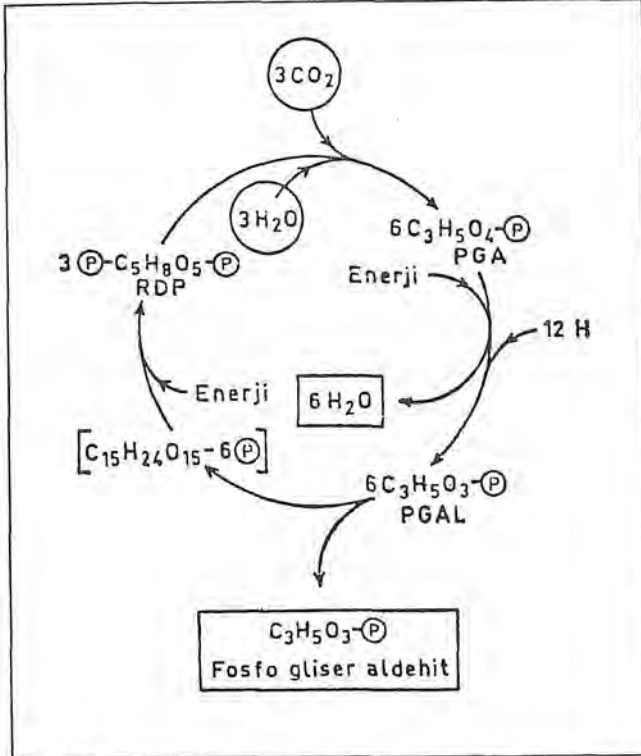
Zincirin tek uçtan mı yoksa iki uçtan mı uzadığı pek kesin olmamakla birlikte yapılan kinetik deneyler, örneğin pamuk lifinde, selülozun sentezinin kalıp mekanizması ile kontrol edildiğini göstermektedir. Pamuk lifinde, çeperde selülozun sentezi üzerindeki araştırmalarda iki faz gözlenmiştir. Döllenmeden sonraki 16-20 gün içinde selüloz zincirleri devamlı fakat yavaş büyümektedir. Selülozik kalınlaşma (sekonder çeper oluşumu) başladığında ise polimerizasyon derecesi hızla artmaktadır. Olgunluğun artması ile birim zamanda oluşan selüloz moleküllerindeki glukoz ünitelerinin sayısı 14.000'i bulmaktadır [Mühlethaler, 1969].

Günümüzde kesin bilinen bir diğer husus da selülozik zincirlerin serbest olmayıp birbirleriyle -H- ve Vander Walls kuvvetleriyle bağlanmış olmaları ve bunun sonucu belirli yapıların meydana gelmiş olmasıdır.

3. BİTKİ HÜCRE ÇEPERİNDEKİ SELÜLOZUN KRİSTALİN YAPISI

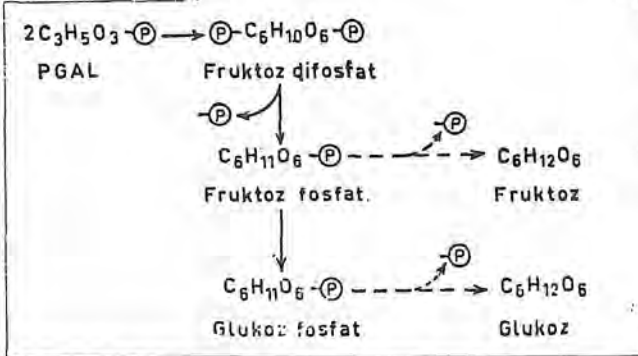
Yukarıda kısaca tabiatta nasıl meydana geldiği özetlenen selülozun bitki hücre çeperinin esas kimyasal yapısını oluşturduğu ilk defa 1847 yılında Payen tarafından ortaya atılmıştır. "Selüloz" Payen'in bütün bitkisel hücre çeperinin esas komponenti olarak nitelediği maddeye verdiği isimdir. Payen'ne göre bu madde, yani selüloz, hücre çeperinde, sert, mumlu maddeler tarafından bir kabuk gibi sarılmıştır. Kimyasal yapı bakımından nişasta gibi bir karbonhidrattır, fakat iyotla verdiği reaksiyonu nişastaminkinden farklıdır. Halbuki Payen'den önceki araştırmacılar, bitki hücre çeperinin tek bir kompleks maddeden yapıldığını ileri sürmüşler ise de bu kompleks maddenin kimyasal yapısı çözümlenmemiştir [Dennis 1962].

Payen tarafından ileri sürülen, bitki hücre çeperinin selülozdan meydana geldiği şeklindeki görüş, daha sonraki bazı araştırmacılar tarafından kabul görmemiştir. Bu araştırmacılara göre, Payen'in selüloz olarak belirttiği çeper maddesi, ekstraksiyon sırasında meydana gelen bir parçalanma ürünüdür. Bu görüş uzun bir süre selüloz üzerinde araştırmalar yapan Gross ve Bevan'ın (1880-1889) geniş bir araştırma grubu tarafından da



Şekil 1. Fotosentez olayında CO_2 bağlanma ve indirgenmesindeki Calvin çemberi reaksiyonlarının genel şeması [Weisz ve Fuller, 1962]

Günümüzde artık fotosentezin karanlık reaksiyon evresindeki ana reaksiyon basamaklarında oluşan PGAL'in iki molekülünün birleşerek 6 C'lu kararlı karbonhidratların meydana geldiği, oluşan bu maddenin kondanzasyonu ile de daha karmaşık karbonhidratların sentezlendiği bilinmektedir. Sonuç olarak, yeşil bitkilerin fotosentez yetenekleri sayesinde çok basit olan CO_2 molekülleri çok karmaşık ve büyük molekülü organik bileşikler haline dönüştürülebilmektedir. Şekil 2'de PGAL'den glukozun meydana geliş şeması görülmektedir.



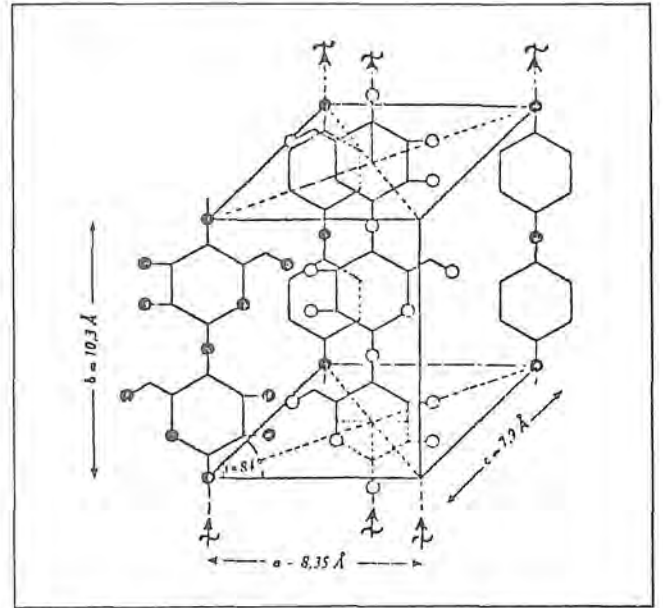
Şekil 2. Fotosentezin son kademesinde glukozun oluşum şeması [Vardar ve Güven, 1990]

Yapraklarda meydana gelen glukozun önce bitkilerin diğer doku ve hücrelerine taşınarak biriktirildiği ve orada selüloza dönüştüğü sanılmaktadır. Ancak tabiat-

desteklenmiştir [Dennis, 1962].

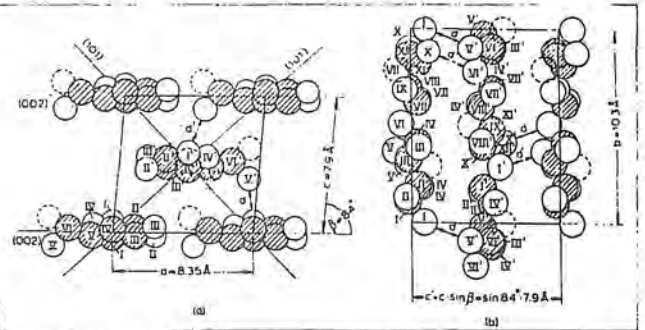
Bitkisel hücre çeperinin kimyasal yapısı üzerindeki bu tartışmalar yanında, 1858 yılında Nägeli, bitki hücre çeperinin "misel" adı verilen selüloz paketleri ile bunlar arasında kalan "inter miseller alan" adı verilen boşluklardan ibaret olan bir iç yapıya sahip olduğunu ileri sürmüştür. Nägeli'ye göre, bitki hücresinin çeper madesi kristalin bir yapı gösterir. Selülozun kristalin yapısı ilk defa Nägeli tarafından polarize mikroskopta gözlenmiştir. Fakat Payen ile karşıt görüşe sahip olan, yani selülozun ekstraksiyonu esnasında oluşan bir ürün olduğuna inanan araştırmacılar arasındaki görüş farklılıklarındaki çelişkiler X-ışın analizi çalışmalarına kadar çözümlenememiştir. 20.yüzyıl başlarında, 1913 yılında, Hishikova ve Ona, bitki hücre çeperinin X-ışın ile difrakte edilebileceğini, 1920 yılında Herzog ve Janke farklı bitkilerden elde edilen hücrelerdeki çeper materalinin ayrı X-ışın diyagramını verdiğini ve bitki hücre çeperinin bol miktarda selülozdan meydana geldiğini göstermişlerdir [Dennis, 1962].

1920 yılından sonraki pek çok araştırma, bitki hücre çeperindeki selülozun Nägeli tarafından ileri sürülen kristalin yapısına yönelmiştir. Sponsler 1926 yılında, selülozun Nägeli'nin belirttiği gibi küçük kristalin birimlerden oluştuğunu, her bir birimin geometrik yapısının sabit olduğunu ifade etmiştir. Çünkü araştırmaya göre, hücre çeperinde, yukarıda oluşumunu açıkladığımız zincirler serbest halde olmayıp birbirleriyle bazı bağlar ve kuvvetlerle bağlanmıştır. Sponsler'e göre dikdörtgenler prizması şeklindeki her bir ünite $a=6.1 \text{ \AA}$, $b=10.3 \text{ \AA}$ $c=5.4 \text{ \AA}$ dir. β açısı ise 88° dir. Bu duruma göre bu prizma monoklinikdir. O halde selülozda monoklinik kristal fikri ilk olarak Sponsler'e aittir [Dennis, 1962]. Sponsler ayrıca bu selülozik kısımların birleşerek hücre çeperi boyunca uzandığını da ileri sürmüştür. Bu görüş daha sonra 1929 yılında Meyer ve Mark tarafından, Nägeli'nin misel adını verdiği kristalin yapı görünüşü ile birleştirilerek daha tatmin edici bir düzeye getirilmiştir. Meyer ve Mark, Sponsler'den farklı boyutlara sahip bir ünite modeli ileri sürmüştür [Meyer ve Misch, 1937]. Bu model Şekil 4 de görülmektedir. 1930 yılında Brag, Sponsler ile Meyer ve Mark'ın ileri sürdüğü geometrik birimlerin her bitkisel hücrede birbirine çok benzediğini ifade etmiştir. [Dennis 1962]. Meyer ve Misch (1937) Meyer ve Mark tarafından ileri sürülen $a=8.35 \text{ \AA}$, $b=10.3 \text{ \AA}$ $c=7.9 \text{ \AA}$ ve $B=84^\circ$ olan kristal üniteye lif ekseni yani b kenarına paralel olan elementer zincirden geçen iki sellobioz molekülünün birbirinin tersi olacak biçimde yerleştiğini ifade etmiştir.



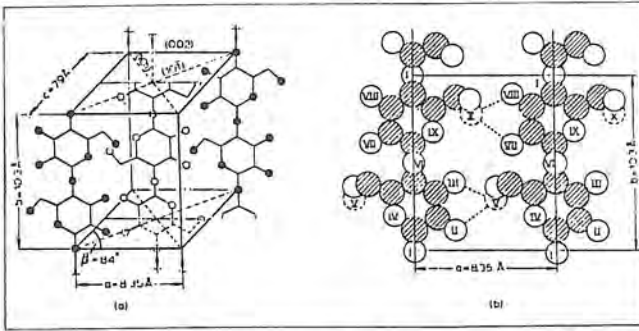
Şekil 4. Meyer ve Mark'a göre bir kristal ünite [Meyer ve Misch, 1937]

Meyer ve Mark'a göre ise aynı idi. Şekil 5 de Meyer ve Misch (1937) tarafından gösterilen bir kristal ünite modeli ve -H- bağları ile bağlantısı görülmektedir. Şekil 6 da da a ve b eksenini yönünde selülozik zincirlerin yerleşimi görülmektedir. Şekil 5 ve 6'nın incelenmesinden de anlaşılacağı gibi b kenarı lif ekseni yönüdür ve 2 glukoz molekülünün sığabileceği genişliktedir. Selüloz zincirlerine paralel düzlem 0.02, kısa diagonal düzlem ise 101, onu kesen düzlem de 101 olarak sembolize edilmiştir. Preston (1952)'a göre iki kristal ünitenin görünüşü Şekil 7 deki gibidir. Burada iki kristal ünite yanyana görülmektedir. Üniteye a ve b arasındaki açı 90° , b ve c arasındaki açı 90° c ve a arasındaki açı 84° dir.

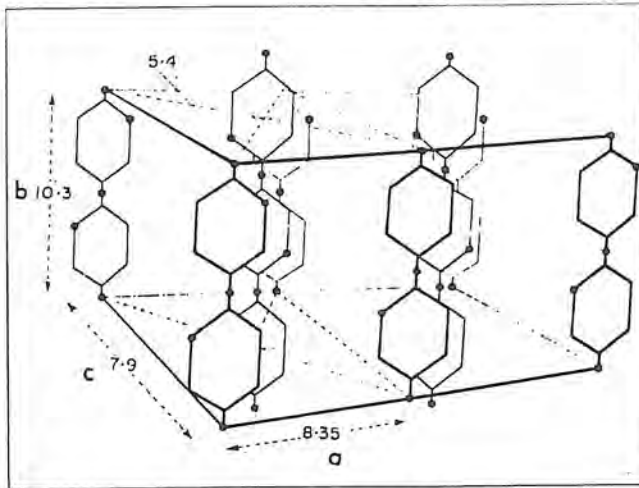


Şekil 5. Meyer ve Misch'e (1937) göre bir kristal ünite boyutları ve H-bağlarıyla bağlantısı

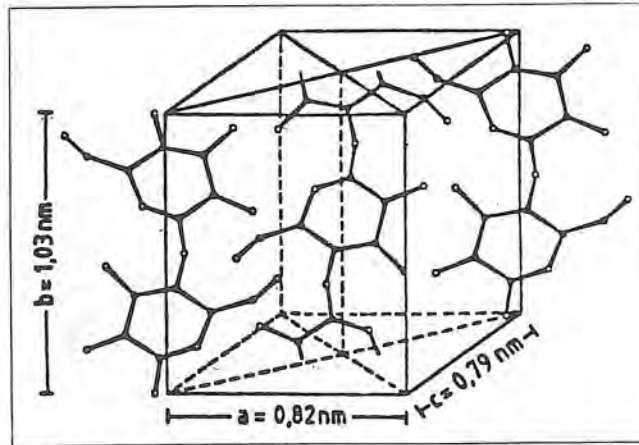
1976 yılında Sarko, kristal üniteye paralel zincir konumunda daha stabil bir durumun söz konusu olduğunu, 1985 yılında da da Fengel, kristal üniteye $b=8.2 \text{ \AA}$ olduğunu ve karşıt zincir çiftlerinin yerleşiminin söz konusu olduğunu ifade etmiştir. Şekil 8'de Fengel tarafından gösterilen kristal ünite modeli görülmektedir [Zhan, 1986].



Şekil 6. Kristalin ünite içinde selülozik zincirlerin yerleşimi [Meyer ve Misch, 1937]
a) b ekseninde b) a ekseninde



Şekil 7. Preston'a (1952) göre, yan yana iki kristal ünitenin görünüşü

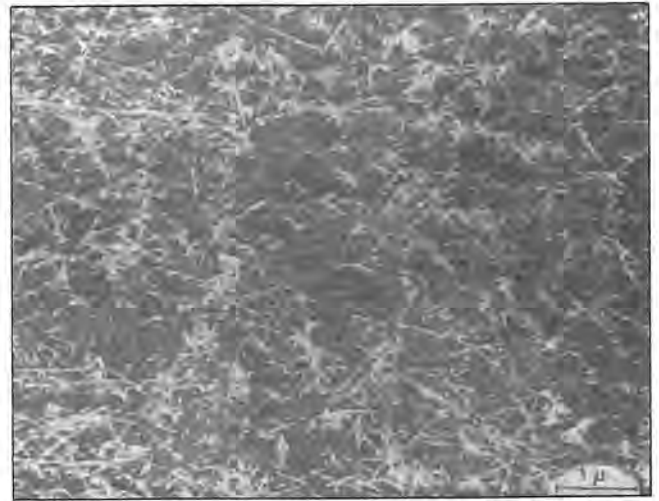


Şekil 8. Fengel'e göre bir selülozik kristal ünitesi [Zhan, 1986]

4. ÇEPER SELÜLOZUNUN FİBRİLER YAPISI VE KRİSTALİNİTE İLE BAĞDAŞTIRILMASI

Bitki hücre çeperinin fibriller bir yapıya sahip olduğu ilk defa 1682 yılında Hehemiak Grew tarafından ileri sürülmüştür [Preston, 1951]. O zaman maksada uygun olmayan optik mikroskopla elde olunan ilk gözlemler, daha sonraki yıllarda optik mikroskopun gelişmesine paralel olarak pek çok araştırmacıya konu olmuştur. Örneğin; 1855 yılında Cruger, 1858 yılında Nægeli,

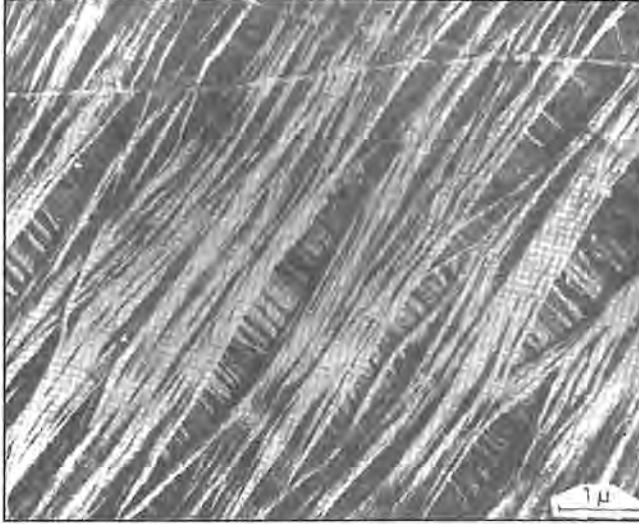
1892 yılında Wiesner, 1922 yılında Reimers... gibi (Preston 1951). Daha sonra Frey (1927), Kerr ve Bailey (1935), Anderson ve Kerr (1938), Kundu ve Preston (1940), Hook (1942), Kerr (1946) ve daha pek çok araştırmacı hücre çeper selülozunun fibriller yapısını normal optik mikroskopta bazıları polarize mikroskopta, değişik preparasyon teknikleri ile incelenmişler ve enteresant bulgular elde etmişlerdir. Faz kontrast, interferens ve özellikle elektron mikroskopun bulunuşundan sonra elektronmikroskopik araştırmalar, örneğin Preston (1951), Trip ve ark. (1951), Roelofsen (1951 a ve b), Vogel (1953), Heyn (1966 ve 1969), Frey Wyssling ve Mühlethaler (1965) gerek müşterek gerekse diğer araştırmacılarla birlikte yaptıkları araştırmalarda; bitki hücre çeper selülozunun mikrofibrillerinin çeper içindeki dizilişinin homojen olmadığı, sekonder çeperin ayrıldılmasında yardımcı olduğunu göstermiştir. Araştırmalar primer çeperin gevşek bir mikrofibriller düzene sahip olduğunu, dıştaki mikrofibrillerle içtekilerin yerleşim düzeni bakımından farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Dışta dağınık bir yönelme söz konusu iken içte enine yerleşim söz konusudur. Bu yapı primer çeperin ağ görüntüsünü oluşturur. Şekil 9'da Primer çeper fibrillerinin ağ düzeni görülmektedir [Frey-Wyssling Mühlethaler, 1965].



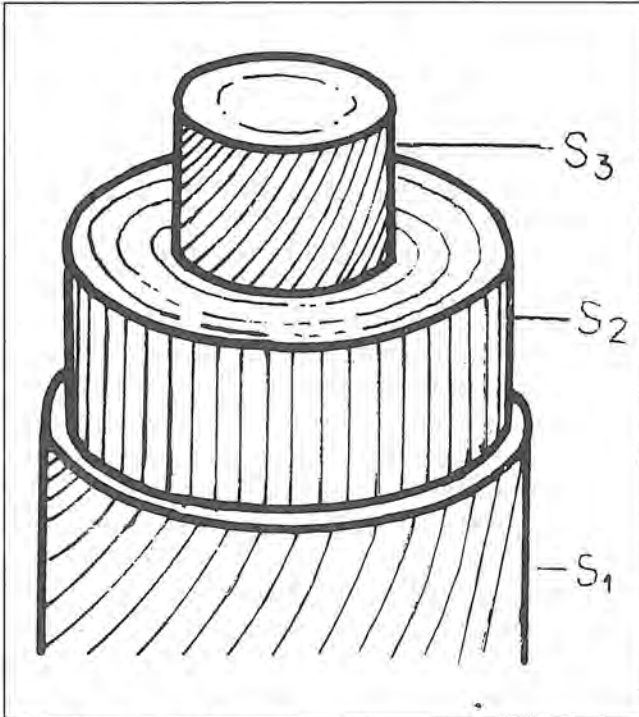
Şekil 9. Primer çeper fibrillerinin ağ düzeni [Frey-Wyssling ve Mühlethaler, 1965]

Sekonder çeperde ise fibrillerin yerleşim düzenine göre 3 tabaka mevcuttur, S₁, S₂ ve S₃. Odun lif hücrelerinde dördüncü bir tabaka da gözlenir [Wardrop ve Dadswell, 1957]. Bu tabakalarda mikrofibrillerin yerleşim düzeni pamuk, keten, kenevir, sisal, jüt gibi lif hücrelerinde de değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. S₁, S₂ ve S₃ de mikrofibriller lif eksenine paralel fakat helis yaparak ilerler. Mikrofibrillerin eksene paralel seyretmesi sekonder çeperin önemli bir özelliğidir. S₁ ve S₃ de 50°-70° S₂ de ise 10°-40° helis söz konusu

dur [Frei ve ark, 1957; Dadswel ve Wardrog, 1957]. Mikro fibrillerin sekonder çeper katlarındaki helezonu sağa (S) veya sola (Z) doğrudur. Bu, hücrenin orijinine bağlıdır. Şekil 10'da mikrofibrillerin paralel düzeni [Frey-Wyssling ve Mühlethaler, 1965], Şekil 11'de de bir keten lif hücresinin sekonder çeper katlarında mikrofibrillerin helezonunun şematik görünüşü görülmektedir [Rogers ve Perkins 1968]. Sekonder çeper kalınlığı lifin olgunluk derecesine bağlı olmakla birlikte primer çeperden kalındır. Sekonder çeperde ise en kalın kat S_2 katıdır.



Şekil 10. Sekonder çeper fibrillerinin paralel düzeni [Frey-Wyssling Mühlethaler, 1965].



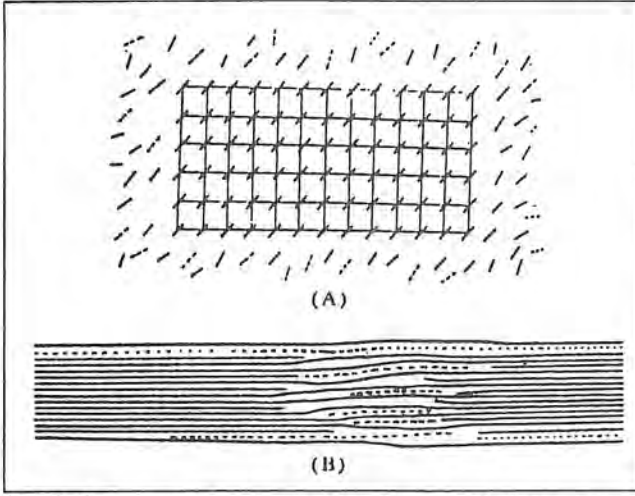
Şekil 11. Bir keten lif hücresinin sekonder çeper katlarındaki fibriller oryantasyonun şematik görünüşü [Rogers ve Perkins, 1968]

İlk defa Frey-Wyssling (1936) rami lif hücresi sekonder çeperini inceleyerek fibriller yapıyı Năgelinin miseller strüktürü ile bağdaştırmaya çalışmıştır. Năgeli'nin misel olarak tanımladığı kristalitte ileri sürdüğü münferit paketlenme teorisine karşılık Frey-Wyssling çeperdeki selülozik zincirlerin münferit ve ayrı paketler teşkil etmediğini ileri sürmüştür. Araştırmacıya göre, yanyana uzanan selüloz zincirleri birbirlerine yaklaşık yoğunlaştıkları bölgede kristalize olmuş gibi görünürler ve bu bölgenin yapısı sanki münferit paketler varmış gibi bir görünüm kazanır. Frey-Wyssling'e göre miseller 60° çapındadır ve bunlar birleşerek 250° çapında mikrofibrilleri oluştururlar. Miseller arasındaki mesafe 10° , mikrofibriller arasındaki mesafe de 100° dur.

1948 yılında Preston ve arkadaşları, ile Frey-Wyssling ve arkadaşlarının ilk elektron mikroskopik araştırmaları ile mikrofibrillerin iç yapısı üzerindeki araştırmalar yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu araştırmacılar selülozun $100-200^\circ$ genişliğinde düz şeritler halinde mikrofibril içerdiğini ve bunların enine kesit boyutlarının hücrenin orijinine göre değiştiğini ifade etmiştir. Preston'a (1951) göre mikrofibrillerin enine kesiti dikdörtgendir ve genişlik ile kalınlık arasındaki oram $1/2-1/7$ dir. Vogel'e göre mikrofibril $173-203^\circ$ genişliğindedir kalınlık ise 30° dur. Colvin (1963) ise Acetobacter xylinum da mikrofibril genişliğinin $150-200^\circ$, kalınlığının 30° olduğunu belirtmiştir. Halbuki bakteriyel selülozda mikrofibril genişliği 300° dur [Ohad ve Dannon, 1964]. Dolmetsch ve Dolmetsch'e göre (1962), pamuk mikrofibrillerinin genişliği $100-500^\circ$ iken Betrabet ve Rollins'e (1970) göre enine kesiti $110 \times 25^\circ$ dur. Kolpak ve arkadaşlarına göre (1975) pamuk mikrofibrilleri koherent şeritler halinde olup genişliği $100-200^\circ$ dur. Daha pek çok araştırmada da görülmüştür ki mikrofibril genişliği hücrenin orijinine göre değişmektedir.

Mikrofibrillerin incelenmesi sırasında bunların daha küçük birimlerden oluştuğu gözlenmişse de bunların izole edilebileceğini ilk defa 1951 yılında Rănby göstermiştir [Frey-Wyssling ve Mühethaler, 1965]. Vogel (1953) bu küçük yapıların genişliğinin 30° olduğunu ifade ederken 1954 yılında Frey-Wyssling mikrofibril enine kesitinde 4 adet $70 \times 30^\circ$ lik kristalitlerin amorf selülozla birbirine tutunmuş olduğunu ve amorf bir materyalle (matriks) sarılmış bir yapıya sahip bulunduğunu göstermiştir [Dennis, 1962]. Buna göre, bir mikrofibril 4 adet kristalitin sığabileceği genişliktedir ve enine kesiti $280 \times 120^\circ$ dur. Hess ve arkadaşlarına (1957) göre de selüloz mikrofibrillerinde kristalin ve parakristalin (kristal olmayan) bölgelerden oluşan küçük birimler mevcuttur. Preston ve Cronshaw (1958) ise Valonia mikrofibrillerin hemen hemen tamamen kristalin oldu-

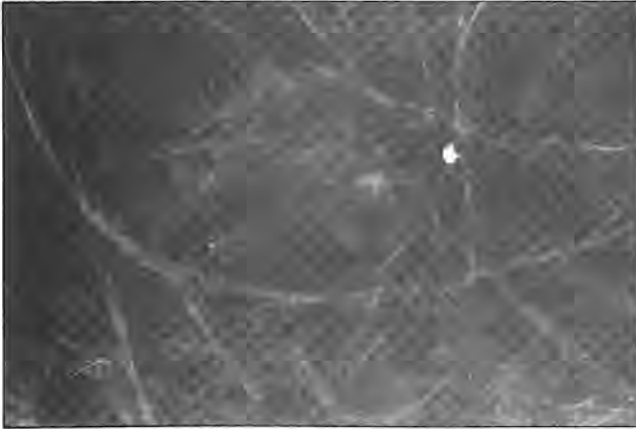
ğunu ifade etmişlerdir. Preston ise 1959 yılında mikrofibrillerin merkezi bir özden ibaret olduğunu, amorf bölgelerde ise glukoz olmayan bölgelerin yer aldığını şematize etmiştir. Şekil 12'de bunlar kesik çizgiler halinde gösterilmiştir [Dennis, 1962].



Şekil 12. Preston tarafından ileri sürülen mikrofibril yapısı [Dennis, 1962]. A) enine B) uzunluğuna

Mühlethaler (1960) Alhum cepa (soğan) kök ucu hücrelerinin primer çeperinde mikrofibril içindeki küçük fibrillerin elektronmikroskopta fotoğrafını çekerek yayınlamıştır (Şekil 13). Frey-Wyssling ve Mühlethaler (1963) 35 A° kalınlığında olan bu yapıları "elementer fibril" adını vermişlerdir. Bu terim ilk defa bu araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

Frey-Wyssling ve arkadaşları (1966) tarafından bu yapı Valonia hücresi sekonder çeperinde ultrasonik yöntemlerle incelenerek Şekil 14'deki görüntüyü elde etmişlerdir. Böylece mikrofibril içinde elementer fibrillerin ilk görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 13. Selülozun Elementer Fibrilleri (Mühlethaler, 1960)

Daha sonraki araştırmaların çoğu mikrofibrillerin içindeki bu yapının boyutlarına hasredilmiştir. Örneğin; Jeffries ve arkadaşları (1969) pamuk lifinde elementer fibrilin 75 A° kalınlığında, Ingram (1969), Ingram ve Peterlin (1970) 50-60 A° olduğunu fakat bunun



Şekil 14. Valonia selülozunda mikrofibril içindeki elementer fibriller [Frey-Wyssling ve ark. 1966]

35-40 A° kristalin öz içerdiğini ifade etmişlerdir. Halbuki Frey-Wyssling ve Mühlethaler (1963) 35 A° kalınlığındaki elementer fibrillerin tamamıyla kristalin olduğunu (Valoniada) belirtmişlerdi. Hagege ve arkadaşlarına (1969), Ohad ve Dannon'a (1963) göre ise 20x30 A° dur. Heyn (1966) ise 20 A° olduğunu belirtmiştir. Dolmetsch ve Dolmetsch'e (1962) göre ise 50-70 A°, Betrabet ve Rollins'e (1970) göre pamuk lifinde 25 A°, Kahli fu ve arkadaşlarına göre (1991) 37.5x26.1 A° dur. Daha pek çok araştırmacının bulgularından da anlaşılmaktadır ki elementer fibrilin enine kesit ölçüsü bitki hücresinin orijinine göre değişebilmektedir.

Elementer fibril içindeki selülozik zincirlerin yerleşim düzeni de daha önceki araştırmalarla birleştirilerek açıklanmaya çalışılmıştır. Frey-Wyssling (1954) tarafından ileri sürülen saçak-misel teorisine göre mikrofibril içindeki strandlar kristalin ve parakristalin parçalarından oluşur. Bunlar birçok kristalin bölümlerin içinden geçen uzun selüloz molekülleri tarafından koherent bir yapıda birleşmişlerdir. Hess ve arkadaşları (1957) tarafından ileri sürülen genişletilmiş zincir modeli de pek çok araştırmacı tarafından tartışılmıştır. Çünkü birçok kristalin polimerin katlanmış konformasyona sahip olduğu anlaşılmış ve bu buluşlar selüloza da uygulanmıştır. Elementer fibrilde selülozik zincirlerin katlanmaları 1960 yılında Tonnesen ve Ellefsen, 1962 yılında Dolmetsch ve Dolmetsch, 1964 yılında Manley, 1960 yılında da Mark ve Figini tarafından teorik olarak açıklanmıştır [Mühlethaler, 1969]. Selüloz trikarboniler kristalleri içindeki katlanmış konformasyonun deneysel kanıtı 1964 yılında Bittiger ve Huseman tarafından gösterilmiştir. Bu araştırmacılar selüloz da 700 A° kadar uzunlukta çubukçuklar tesbit etmişler ve bu uzunlukta 135 glukoz ünitesinin belli bir uzunluğu oluşturduğunu ve bu uzunluk kısımlarının belli aralıklarla katlandığını ifade etmişlerdir. Deneyler, kendi üzerinde katlanma kabiliyetinin bütün uzun zincir moleküllerinde ortak olan bir özellik olduğunu kanıtlamıştır. Bu

