

Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme, Pedobarografik Analiz ve Ortotik Tabanlık Tasarımı

Dr. Öğr. Üyesi Ayfer Peker Karatopark

**ÖZGÜR
YAYINLARI**

Diyabetik Ayakta
Biyomekanik
Değerlendirme,
Pedobarografik Analiz
ve Ortotik Tabanlık
Tasarımı

Dr. Öğr. Üyesi Ayfer Peker Karatopark



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozguryayinlari.com

✉ info@ozguryayinlari.com

Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme, Pedobarografik Analiz ve Ortotik Tabanlık Tasarımı

Dr. Öğr. Üyesi Ayfer Peker Karatoprak

Language: Turkish

Publication Date: 2026

Cover paint by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8998-57-3

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1274>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Peker Karatoprak, A. (2026). *Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme, Pedobarografik Analiz ve Ortotik Tabanlık Tasarımı*. Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1274>.

License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozguryayinlari.com/>



Önsöz

Diyabet mellitus dünya genelinde hızla artan kronik hastalıklardan biridir ve bu hastalığın en ciddi komplikasyonlarından biri diyabetik ayak ülserleridir. Diyabetik ayak ülserleri yalnızca hastaların yaşam kalitesini olumsuz etkilemekle kalmayıp aynı zamanda sağlık sistemleri üzerinde önemli bir yük oluşturmaktadır. Diyabetik ayak komplikasyonlarının gelişiminde nöropati, vasküler hastalıklar ve biyomekanik faktörlerin önemli rol oynadığı bilinmektedir.

Plantar basınç artışı diyabetik ayak ülserlerinin gelişiminde temel mekanik faktörlerden biridir. Bu nedenle plantar basınç dağılımının değerlendirilmesi ve uygun ortotik müdahalelerin planlanması diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Pedobarografik analizler, ayak biyomekaniklerinin objektif olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan önemli klinik araçlar arasında yer almaktadır.

Bu kitapta diyabetik ayakta biyomekanik değerlendirme, postür analizi, yürüyüş analizi ve pedobarografik analiz yöntemleri ele alınmış; elde edilen verilerin ortotik tabanlık tasarımına nasıl entegre edilebileceği ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca tabanlık tasarım prensipleri, ortotik komponentler, tabanlık materyalleri ve üretim teknikleri ile

diyabetik ayak için uygun ayakkabı tasarımı konuları da ele alınmıştır.

Bu kitabın amacı diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesine yönelik biyomekanik yaklaşımları ve ortotik tasarım prensiplerini sistematik bir şekilde sunarak klinik uygulamalara katkı sağlamaktır.

İçindekiler

Önsöz	iii
1 Diyabetik Ayak ve Ülser Gelişim Mekanizmaları	1
Giriş	1
Diyabetik Ayak Tanımı	2
Diyabetik Nöropati	2
Periferik Arter Hastalığı	3
Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değişiklikler	3
2 Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme	7
3 Postür Analizi	11
Giriş	11
Postüral Bozuklukların Plantar Basınç Üzerine Etkisi	13
4 Yürüyüş Analizi	15
Giriş	15
Yürüyüş Siklusu	16
Diyabetik Hastalarda Yürüyüş Değişiklikleri	17
Plantar Basınç ve Yürüyüş Biyomekaniği	18

5	Pedobarografik Analiz ve Klinik Yorum	21
	Giriş	21
	Pedobarografi Yöntemleri	22
	Pedobarografik Parametreler	27
	Pedobarografik Raporun Klinik Yorumlanması	29
	Tabanlık Komponenti Seçim Algoritması (Pedobarografik Bulgulara Göre)	33
6	Diyabetik Ayakta Off-Loading Prensipleri	37
	Giriş	37
	Off-Loading Yöntemleri	38
	Terapötik Ayakkabılar	38
	Ortotik Tabanlıklar	38
	Total Contact Cast	40
	Removable Walker Sistemleri	40
	Off-Loading ve Tabanlık Tasarımı	40
7	Tabanlık Tasarım Prensipleri	43
	Giriş	43
	Plantar Basınç Redistribüsyonu	44
	Kişiye Özel Tabanlık Tasarımı	44
	Tabanlık Materyalleri	45
	Tabanlık Tasarımında Klinik Değerlendirme	45
8	Tabanlık Komponentleri	47
	Giriş	47
	Metatarsal Pad (Metatarsal Ped)	48
	Arch Support (Medial Longitudinal Ark Desteği)	52
	Forefoot Posting (Ön Ayak Kaması)	53
	Rearfoot Wedge (Arka Ayak Kaması)	54
	Cut-out Tasarımları (Off-loading Tasarımları)	56

Heel Cushion ve Heel Lift (Topuk Yastığı ve Topuk Yükseltici Destekler)	57
Tabanlık Tasarımında Klinik Yaklaşım	58
9 Tabanlık Materyalleri	61
Giriş	61
EVA (Ethylene Vinyl Acetate)	61
Plastazote	62
Poron	63
Poliüretan Materyaller	63
Materyal Seçimi Prensipleri	64
10 Tabanlık Üretim Teknikleri	65
Giriş	65
Manuel Üretim Teknikleri	66
Vakum Şekillendirme	66
CAD-CAM Üretim Sistemleri	67
3D Baskı Tabanlıklar	67
11 Diyabetik Ayakta Ayakkabı Tasarımı	69
Giriş	69
Terapötik Ayakkabılar	69
Rocker Taban Sistemleri	70
Toe Box Genişliği	71
Ayakkabı İç Yapı Özellikleri	71
12 Diyabetik Ayakta Yeni Teknolojiler ve Gelecek Perspektifi	73
Giriş	73
Akıllı Tabanlık Sistemleri	74
Basınç Sensörlü Ayakkabılar	74
Dijital Biyomekanik Analiz Sistemleri	75
Yapay Zeka ve Pedobarografik Analiz	75

KiŒiye Özel 3D Tabanlık Üretimi	75
Gelecek Perspektifi	76
Sonuç ve Klinik Öneriler	77
Kaynaklar	79

Diyabetik Ayak ve Ülser Gelişim Mekanizmaları

1.1 Giriş

Diyabet mellitus, kronik hiperglisemi ile karakterize metabolik bir hastalıktır ve uzun dönemde birçok sistemik komplikasyona yol açabilmektedir. Diyabetin en ciddi komplikasyonlarından biri diyabetik ayak olarak tanımlanan klinik durumdur. Diyabetik ayak, nöropati, periferik arter hastalığı ve enfeksiyon gibi faktörlerin bir araya gelmesi sonucu gelişen ve sıklıkla ülserasyon ile sonuçlanan kompleks bir patolojidir (Boulton et al., 2005).

Diyabetik ayak ülserleri, diyabetli bireylerde hastaneye yatışların en önemli nedenlerinden biri olup alt ekstremitte amputasyonlarının başlıca sebepleri arasında yer almaktadır (Armstrong et al., 2017). Bu nedenle diyabetik ayakta erken tanı, risk faktörlerinin belirlenmesi ve koruyucu stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır.

1.2. Diyabetik Ayak Tanımı

Diyabetik ayak, diyabetli bireylerde periferik nöropati ve/veya periferik arter hastalığı ile ilişkili olarak gelişen enfeksiyon, ülserasyon veya doku destrüksiyonu ile karakterize bir klinik tablo olarak tanımlanmaktadır (Bus et al., 2020). Bu klinik durum genellikle aşağıdaki patofizyolojik mekanizmaların etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır:

- periferik nöropati
- periferik arter hastalığı
- mekanik yüklenme
- enfeksiyon

Bu faktörlerin birlikte etkisi, ayakta doku bütünlüğünün bozulmasına ve ülser gelişimine zemin hazırlamaktadır.

1.3. Diyabetik Nöropati

Periferik nöropati, diyabetik ayak gelişiminde en önemli risk faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Diyabetik nöropati, duyuşal, motor ve otonom sinir liflerini etkileyebilen ilerleyici bir sinir hasarıdır.

Duyuşal nöropati sonucunda ayakta koruyucu duyu kaybı gelişir. Bu durum hastaların ayakta oluşan mekanik stresleri fark edememesine neden olur. Tekrarlayan mekanik yüklenmeler sonucunda plantar dokularda mikrotravmalar oluşabilir ve bu durum ülser gelişimine zemin hazırlayabilir (Boulton et al., 2005).

Motor nöropati ise intrinsik ayak kaslarında zayıflığa yol açarak ayak deformitelerinin gelişmesine neden olabilir. Bu deformiteler plantar basınç dağılımını değiştirerek belirli bölgelerde basınç artışına yol açabilir (van Schie, 2005).

1.4. Periferik Arter Hastalığı

Diyabetik hastalarda sık görülen bir diğer önemli komplikasyon periferik arter hastalığıdır. Bu durum alt ekstremitelerde kan akımının azalmasına ve dokuların oksijenlenmesinin bozulmasına neden olmaktadır.

Periferik arter hastalığı bulunan bireylerde yara iyileşmesi gecikmekte ve enfeksiyon gelişme riski artmaktadır. Bu nedenle diyabetik ayak ülserlerinin tedavisinde vasküler değerlendirme önemli bir yer tutmaktadır (Armstrong et al., 2017).

1.5. Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değişiklikler

Diyabetik nöropatiye bağlı olarak gelişen kas zayıflığı ve deformiteler ayak biyomekaniğinde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişiklikler plantar basınç dağılımının bozulmasına neden olmaktadır.

Diyabetik hastalarda sıklıkla gözlenen biyomekanik değişiklikler şunlardır:

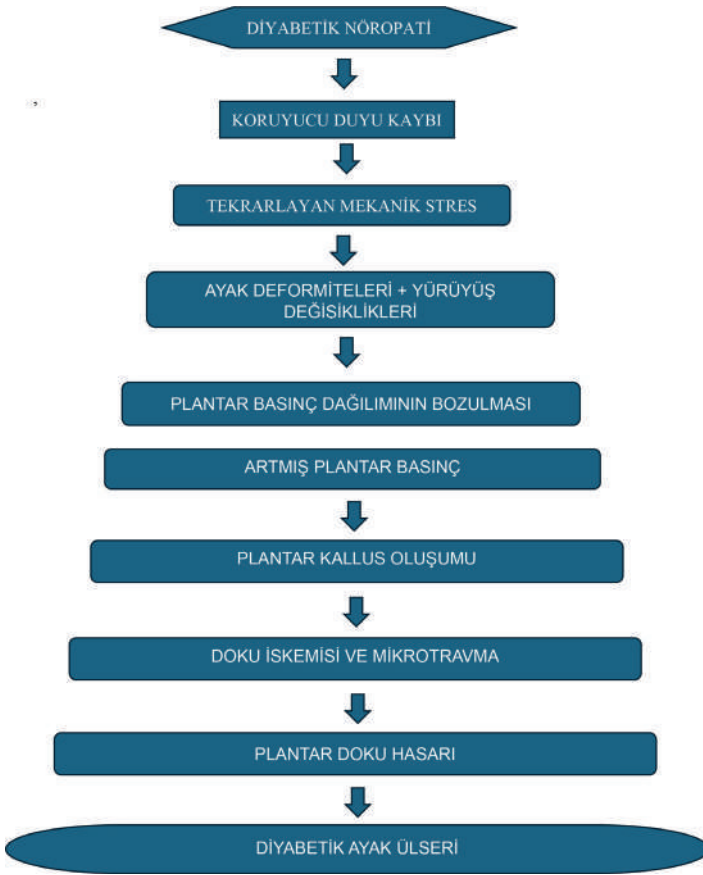
- intrinsik kas atrofisi
- claw toe deformitesi
- metatars başlarında yük artışı
- ayak arkının değişimi

Bu değişiklikler sonucunda plantar basınç belirli bölgelerde yoğunlaşabilir. Özellikle metatars başları, hallux ve topuk bölgelerinde oluşan yüksek basınç değerleri ülser gelişimi ile ilişkilidir (van Schie, 2005; Lavery et al., 2003).

Plantar basınç dağılımının değerlendirilmesi, ülser gelişme riski taşıyan bölgelerin belirlenmesine yardımcı olur. Bu nedenle plantar basınç analizleri diyabetik ayak risk değerlendirmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Pedobarografik analizler sayesinde yüksek basınç bölgeleri erken dönemde tespit edilerek uygun

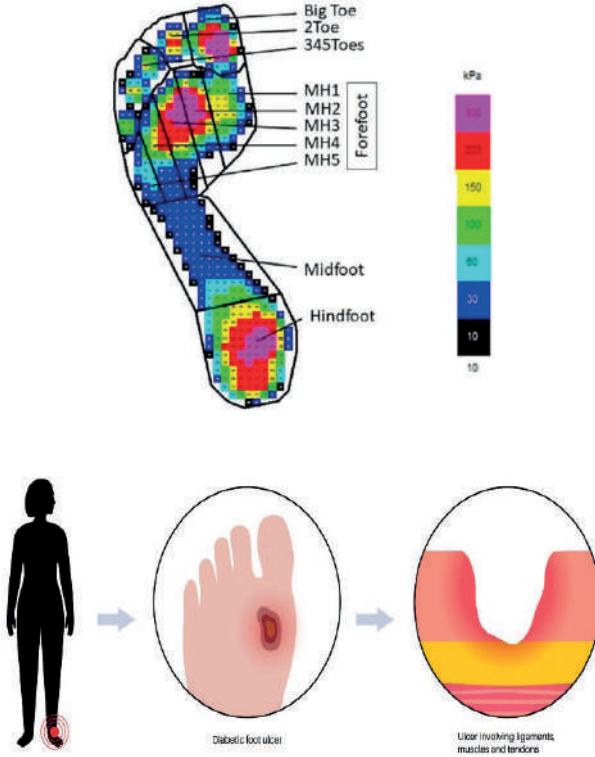
ortotik müdahaleler planlanabilir. Bu yaklaşım plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak ülser gelişiminin önlenmesine katkı sağlar (Cavanagh & Bus, 2010).

Diyabetik ayak ülserleri nöropati, vasküler hastalık ve mekanik yüklenme gibi faktörlerin etkileşimi sonucu gelişen kompleks bir klinik durumdur. Bu nedenle diyabetik ayakta risk faktörlerinin erken dönemde belirlenmesi ve uygun koruyucu stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1.1. Diyabetik Ayakta Plantar Basınç ve Ülser Gelişim Mekanizması

Adapted from: van Schie CHM. Neuropathy: mobility and quality of life. Diabetes Metab Res Rev. 2005.



Şekil 1.2. Pedobarografik plantar basınç dağılımının bölgesel analizi ve risk bölgelerinin şematik gösterimi

MH: Metatars başı; Midfoot: orta ayak; Hindfoot: arka ayak

Şematik çizim. Plantar basınç analizi prensiplerine dayalı olarak hazırlanmıştır.

Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme

Diyabetik ayak komplikasyonlarının gelişiminde biyomekanik faktörler önemli bir rol oynamaktadır. Diyabetik nöropatiye bağlı olarak gelişen duyuşsal kayıp, kas fonksiyonlarında bozulma ve ayak deformiteleri plantar yük dağılımını değiştirebilir ve belirli bölgelerde basınç artışına neden olabilir. Bu durum plantar dokularda tekrarlayan mekanik streslerin oluşmasına ve ülser gelişimine zemin hazırlar (van Schie, 2005).

Diyabetik ayakta biyomekanik değerlendirme, plantar basınç dağılımını etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve uygun koruyucu müdahalelerin planlanması açısından önemli bir klinik adımdır. Klinik değerlendirme sırasında ayak yapısı, deformiteler, eklem hareket açıklığı ve kas fonksiyonları birlikte değerlendirilmelidir (Boulton et al., 2005).

Klinik değerlendirme sırasında aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- ayak deformiteleri

- eklem hareket açıklığı
- kas fonksiyonları
- plantar basınç dağılımı
- yürüyüş biyomekaniği

Bu faktörlerin sistematik şekilde değerlendirilmesi plantar basınç artışına yol açabilecek mekanik risk faktörlerinin belirlenmesine yardımcı olur (Cavanagh & Bus, 2010). Diyabetik nöropatiye bağlı motor sinir hasarı intrinsik ayak kaslarının zayıflamasına yol açabilir. Bu durum ayak deformitelerinin gelişmesine neden olur ve plantar basınç dağılımını değiştirebilir.

Diyabetik hastalarda sık görülen deformiteler şunlardır:

- claw toe deformitesi
- hammer toe deformitesi
- hallux valgus
- metatarsal protrüzyon

Bu deformiteler metatars başları üzerinde artmış basınç oluşmasına yol açabilir ve ülser gelişimi riskini artırabilir (Armstrong et al., 2017). Özellikle metatars başlarında oluşan lokal basınç artışı kallus oluşumuna ve ilerleyen süreçte ülser gelişimine neden olur.

Eklem hareket açıklığı diyabetik ayakta biyomekanik değerlendirmede önemli bir parametredir. Diyabetik hastalarda glikozilasyon ürünlerinin bağ dokularında birikmesi eklem sertliğine yol açabilir. Bu durum özellikle aşağıdaki eklemlerde hareket kısıtlılığına neden olabilir:

- ayak bileği eklemi
- subtalar eklem
- metatarsofalangeal eklemler

Ayak bileği dorsifleksiyonunun azalması yürüyüş sırasında ön ayakta basınç artışına yol açar ve diyabetik ayak ülserlerinin gelişiminde önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir (Boulton et al., 2005).

Diyabetik nöropati motor sinir liflerini etkileyerek kas fonksiyonlarında bozulmaya yol açabilir. İntrinsik ayak kaslarının zayıflaması ayak arkının stabilitesini azaltır ve ayak deformitelerinin gelişimine katkıda bulunur. Bu değişiklikler plantar yük dağılımının bozulmasına neden olur ve özellikle ön ayakta metatars başları üzerinde basınç artışına neden olur (van Schie, 2005). Kas fonksiyonlarının değerlendirilmesi, diyabetik ayakta gelişebilecek biyomekanik risk faktörlerinin erken dönemde belirlenmesine yardımcı olur.

Plantar yağ yastığı ayak tabanında mekanik yüklerin absorbe edilmesinde önemli bir rol oynar. Diyabetik hastalarda plantar yağ yastığında incelme ve elastikiyet kaybı görülebilir. Bu durum plantar dokuların şok absorpsiyon kapasitesini azaltarak mekanik yüklerin doğrudan kemik yapılar üzerine aktarılmasına neden olur. Özellikle metatars başlarında oluşan basınç artışı plantar dokularda hasar gelişimine katkıda bulunur (Cavanagh & Bus, 2010). Bu nedenle diyabetik ayakta plantar yağ yastığının değerlendirilmesi biyomekanik muayenenin önemli bir parçasıdır.

Tablo 2.1. Diyabetik ayakta biyomekanik risk faktörleri ve plantar basınç üzerindeki etkileri

Biyomekanik Faktör	Plantar Basınç Üzerindeki Etki
İntrinsik kas zayıflığı	Ayak deformitelerinin gelişimi
Eklem hareket kısıtlılığı	Ön ayakta basınç artışı
Ayak deformiteleri	Lokal plantar basınç artışı
Plantar yağ yastığının incelməsi	Şok absorpsiyonunun azalması

Kaynak: van Schie, 2005; Cavanagh & Bus, 2010.

Postür Analizi

3.1. Giriş

Postür analizi, bireyin statik duruş sırasında vücut segmentlerinin birbirine göre konumunu ve hizalanmasını değerlendiren önemli bir klinik yöntemdir. Alt ekstremité hizalanması ve ayak postürü, plantar basınç dağılımını etkileyen önemli biyomekanik faktörler arasında yer almaktadır (Kendall et al., 2005).

Diyabetik ayak hastalarında postüral değişiklikler plantar yük dağılımını değiştirebilir ve belirli bölgelerde basınç artışına yol açabilir. Bu durum özellikle nöropati varlığında plantar dokuların mekanik strese daha fazla maruz kalmasına neden olur (van Schie, 2005).

Postür analizinin temel amacı, ayakta durma sırasında vücut segmentlerinin hizalanmasını değerlendirmek ve plantar basınç dağılımını etkileyebilecek biyomekanik faktörleri belirlemektir. Postür analizi sırasında genellikle aşağıdaki yapılar değerlendirilir:

- baş ve gövde hizalanması

- pelvis pozisyonu
- alt ekstremite hizalanması
- diz eklemi pozisyonu
- ayak ve ayak bileği hizalanması

Bu değerlendirme, ayak biyomekaniğini etkileyebilecek postüral bozuklukların belirlenmesine yardımcı olur (Neumann, 2010). Alt ekstremite hizalanması postür analizinin önemli bir bileşenidir. Diz ve ayak bileği eklemlerinin pozisyonu plantar yük dağılımını etkileyebilir. Alt ekstremite hizalanmasında en sık değerlendirilen parametreler şunlardır:

- genu valgum
- genu varum
- tibial torsiyon
- femoral rotasyon

Bu hizalanma değişiklikleri ayakta medial veya lateral kolon yüklenmesini artırabilir ve plantar basınç paternlerinin değişmesine neden olabilir (Neumann, 2010).

Ayak arkları ayak biyomekaniğinde önemli bir rol oynar. Ayakta üç temel ark yapısı bulunmaktadır:

- medial longitudinal ark
- lateral longitudinal ark
- transvers ark

Medial longitudinal ark ayak biyomekaniğinde en önemli yapılardan biridir ve yük transferinde önemli rol oynar. Bu arkın yüksekliği veya çökmesi plantar basınç dağılımını etkileyebilir (Norkin & Levangie, 2016). Pes planus durumunda medial ark çökmesi görülür ve bu durum medial kolon yüklenmesini artırır. Buna karşılık pes cavus deformitesinde plantar temas alanı azalır ve belirli bölgelerde basınç artışı oluşur.

Postür analizinde ön ayak ve arka ayak arasındaki ilişki de değerlendirilmelidir. Ön ayak deformiteleri plantar yük dağılımını etkileyebilir ve belirli bölgelerde basınç artışına yol açabilir. En sık görülen ön ayak deformiteleri şunlardır:

- hallux valgus
- metatarsus primus elevatus
- metatarsal protrüzyon

Arka ayakta ise özellikle subtalar eklem pozisyonu önemlidir. Arka ayakta pronasyon veya supinasyon değişiklikleri plantar yük dağılımını etkiler (Neumann, 2010).

3.2. Postüral Bozuklukların Plantar Basınç Üzerine Etkisi

Postüral değişiklikler plantar basınç dağılımını etkileyebilir. Ayak deformiteleri veya alt ekstremitte hizalanma bozuklukları belirli bölgelerde basınç artışına yol açabilir.

Örneğin:

- pes planus medial kolon yüklenmesini artırabilir
- pes cavus plantar temas alanını azaltabilir
- metatarsal protrüzyon ön ayakta basınç artışına yol açabilir

Bu değişiklikler plantar basınç paternlerini etkileyerek diyabetik ayak ülserlerinin gelişimine katkıda bulunur (van Schie, 2005). Postüral bozuklukların erken dönemde belirlenmesi, plantar basınç artışına yol açabilecek mekanik risk faktörlerinin saptanmasına ve uygun koruyucu müdahalelerin planlanmasına katkı sağlar.

Yürüyüş Analizi

4.1. Giriş

Yürüyüş analizi, bireyin hareket sırasında alt ekstremitte biyomekanikliğinin değerlendirilmesini sağlayan önemli bir klinik yöntemdir. Yürüyüş sırasında oluşan mekanik yükler ayak tabanındaki plantar basınç dağılımını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle yürüyüş analizi diyabetik ayakta biyomekanik değerlendirme sürecinin önemli bir bileşeni olarak kabul edilmektedir (Perry & Burnfield, 2010).

Diyabetik nöropatisi bulunan bireylerde yürüyüş paterninde çeşitli değişiklikler görülebilir. Bu değişiklikler plantar basınç dağılımının bozulmasına ve belirli bölgelerde basınç artışına neden olabilir. Yürüyüş biyomekanikliğinin değerlendirilmesi, diyabetik ayak ülserlerinin gelişiminde rol oynayan mekanik risk faktörlerinin belirlenmesine yardımcı olur (van Schie, 2005).

4.2. Yürüyüş Siklusu

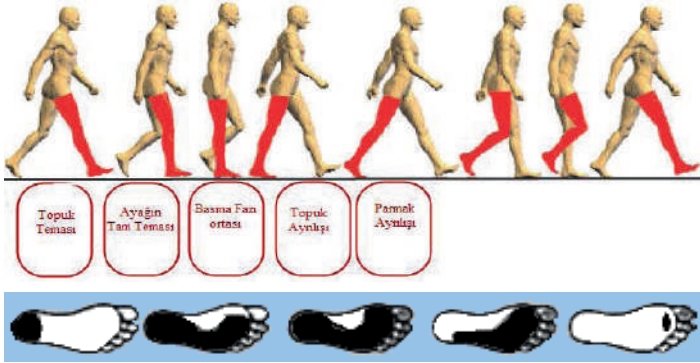
Yürüyüş siklusu, bir ayağın topuk temasından başlayıp aynı ayağın tekrar topuk temasına kadar geçen süreci ifade eder. Yürüyüş siklusu iki ana fazdan oluşur:

- stance fazı
- swing fazı

Stance fazı ayağın zemine temas ettiği ve vücut ağırlığını taşıdığı dönemdir. Bu faz yürüyüş siklusunun yaklaşık %60'ını oluşturur. Swing fazı ise ayağın zeminden ayrıldığı ve ileri doğru hareket ettiği dönemdir ve yürüyüş siklusunun yaklaşık %40'ını kapsar (Perry & Burnfield, 2010). Yürüyüş sırasında plantar basınç dağılımı özellikle stance fazı sırasında oluşur.

Stance fazı kendi içinde birkaç alt evreye ayrılır:

- heel strike (initial contact) – topuk teması
- loading response – ayağın tam teması
- midstance – basma fazı ortası
- terminal stance – topuk ayrılışı
- pre-swing- parmak ayrılışı



Şekil 4.1.. Yürüyüş siklusunun fazları ve plantar basınç dağılımının şematik gösterimi.

Şematik gösterim. Yürüyüş biyomekaniği prensiplerine dayalı olarak hazırlanmıştır (Perry & Burnfield, 2010).

Heel strike aşamasında topuk zemine ilk temas eden bölgedir ve plantar basınç öncelikle topuk bölgesinde yoğunlaşır.

Midstance evresinde vücut ağırlığı ayak üzerinde dengelenir ve plantar yük orta ayak bölgesine aktarılır. Terminal stance ve pre-swing aşamalarında ise yük ön ayağa transfer edilir ve metatars başları ile hallux bölgesinde basınç artışı oluşur (Perry & Burnfield, 2010).

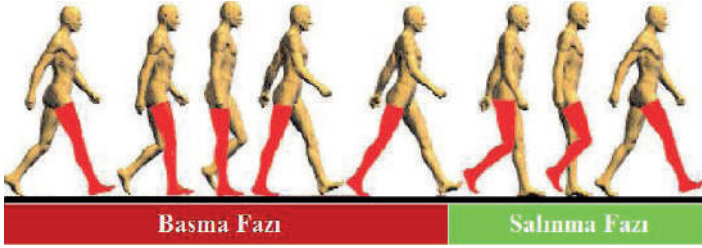
4.3. Diyabetik Hastalarda Yürüyüş Değişiklikleri

Diyabetik nöropatisi bulunan bireylerde yürüyüş paterninde çeşitli değişiklikler gözlenebilir. Duyusal kayıp ve kas fonksiyonlarındaki bozulma yürüyüş stabilitesini etkileyebilir.

Diyabetik hastalarda sıklıkla gözlenen yürüyüş değişiklikleri şunlardır:

- yürüme hızında azalma
- adım uzunluğunda kısalma
- stance fazında uzama
- çift destek süresinde artış

Bu değişiklikler genellikle bireyin stabilizeyi artırmak amacıyla geliştirdiği kompensatuar mekanizmalar olarak değerlendirilmektedir (Armstrong et al., 2017).



Şekil 4.2. Yürüyüş siklusunun fazlarının şematik gösterimi.

Şematik gösterim. Yürüyüş biyomekaniği prensiplerine dayalı olarak hazırlanmıştır (Perry & Burnfield, 2010).

4.4. Plantar Basınç ve Yürüyüş Biyomekaniği

Yürüyüş sırasında plantar basınç dağılımı ayak biyomekaniğinin önemli bir göstergesidir. Yürüyüş siklusu boyunca plantar basınç topuktan ön ayağa doğru progresif bir şekilde transfer edilir.

Normal yürüyüş sırasında basınç dağılımı aşağıdaki sırayı izler:

1. topuk
2. orta ayak
3. metatars başları
4. hallux

Diyabetik hastalarda bu yük transferi mekanizması bozulabilir ve metatars başları veya hallux bölgesinde aşırı basınç oluşabilir. Bu durum diyabetik ayak ülserlerinin gelişiminde önemli bir risk faktörü olarak kabul edilmektedir (Lavery et al., 2003).

Yürüyüş Analizinin Klinik Önemi

Yürüyüş analizi diyabetik ayakta biyomekanik risk faktörlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yürüyüş paterninin değerlendirilmesi plantar basınç dağılımını etkileyen mekanik faktörlerin anlaşılmasına yardımcı olur.

Yürüyüş analizinin klinik kullanım alanları şunlardır:

- plantar basınç artışı olan bölgelerin belirlenmesi
- ayak deformitelerinin biyomekanik etkilerinin değerlendirilmesi
- ortotik müdahalelerin planlanması
- tedavi sonrası biyomekanik değişikliklerin değerlendirilmesi

Yürüyüş analizi pedobarografik ölçümler ile birlikte değerlendirildiğinde diyabetik ayak hastalarında plantar yük dağılımının daha kapsamlı şekilde analiz edilmesine katkı sağlar (van Schie, 2005).

Tablo 4.1. Diyabetik hastalarda gözlenen yürüyüş patern değişiklikleri ve klinik sonuçlar

Yürüyüş Değişikliği	Klinik Sonuç
Yürüme hızında azalma	Stabiliteyi artırmaya yönelik kompensatuar adaptasyon
Adım uzunluğunda kısalma	Enerji tüketiminde artış
Stance fazında uzama	Plantar yük dağılımında değişim
Çift destek süresinde artış	Denge kontrolünün artırılması

Diyabetik nöropatisi bulunan bireylerde yürüyüş paterninde meydana gelen değişiklikler genellikle stabiliteyi artırmaya yönelik kompensatuar mekanizmalar olarak değerlendirilmektedir. Kaynak: Perry & Burnfield, 2010; van Schie, 2005.

Pedobarografik Analiz ve Klinik Yorum

5.1. Giriş

Pedobarografi, ayak tabanında oluşan plantar basınç dağılımının ölçülmesini sağlayan objektif bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem sayesinde ayak tabanındaki yüklenme paternleri ve yürüyüş sırasında oluşan basınç değişimleri analiz edilebilir (Orlin & McPoil, 2000). Özellikle diyabetik ayak hastalarında plantar basınç dağılımının değerlendirilmesi, ülser gelişimi açısından risk taşıyan bölgelerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (van Schie, 2005).

Diyabetik nöropatiye bağlı olarak gelişen koruyucu duyu kaybı, hastaların ayakta oluşan mekanik yüklenmeleri fark etmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum tekrarlayan mikrotravmaların birikmesine ve plantar dokularda hasar gelişmesine yol açabilir. Pedobarografik analizler sayesinde yüksek plantar basınç bölgeleri erken dönemde tespit edilerek uygun koruyucu müdahalelerin planlanması mümkün olmaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

5.2. Pedobarografi Yöntemleri

Pedobarografik analizler ayak tabanındaki basınç dağılımını değerlendirmek amacıyla kullanılan objektif ölçüm yöntemleridir. Bu analizler ayakta oluşan yük dağılımı, basınç paternleri ve postüral kontrol mekanizmaları hakkında önemli bilgiler sağlar (Orlin & McPoil, 2000).

Pedobarografik değerlendirmeler genel olarak üç farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir:

- statik pedobarografi
- dinamik pedobarografi
- stabilometrik analiz

Bu yöntemler ayak biyomekaniğinin farklı yönlerini değerlendirmeye olanak sağlar ve birlikte kullanıldıklarında plantar yüklenme paternlerinin daha kapsamlı şekilde analiz edilmesine katkıda bulunur (van Schie, 2005).

5.2.1. Statik Pedobarografi

Statik pedobarografi, bireyin ayakta sabit durduğu pozisyonda plantar basınç dağılımının değerlendirilmesini sağlayan bir analiz yöntemidir. Bu ölçüm genellikle basınç sensörleri içeren platformlar aracılığıyla gerçekleştirilir ve bireyin her iki ayağı üzerinde ağırlık dağılımını nasıl gerçekleştirdiğini ortaya koyar. Statik analizler özellikle postür değerlendirmesi ve ayakta yük dağılımının genel paternini incelemek için kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde ayakta oluşan asimetrik yüklenmeler ve ayak arkının yüklenme özellikleri değerlendirilebilir (Orlin & McPoil, 2000).

Statik pedobarografik analizler sayesinde aşağıdaki parametreler değerlendirilebilir:

- sağ ve sol ayak arasındaki yük dağılımı

- ön ayak ve arka ayak yük oranı
- medial ve lateral kolon yüklenmesi
- plantar temas alanı
- maksimum basınç bölgeleri

Diyabetik ayak hastalarında statik pedobarografi özellikle kallus oluşumuna yatkın bölgelerin ve yüksek yük taşıyan plantar alanların belirlenmesine yardımcı olur. Bununla birlikte statik ölçümler yürüyüş sırasında oluşan dinamik yüklenmeleri tam olarak yansıtmayabilir; bu nedenle klinik değerlendirme sırasında dinamik analizlerle birlikte yorumlanması önerilmektedir.

5.2.2. Dinamik Pedobarografi

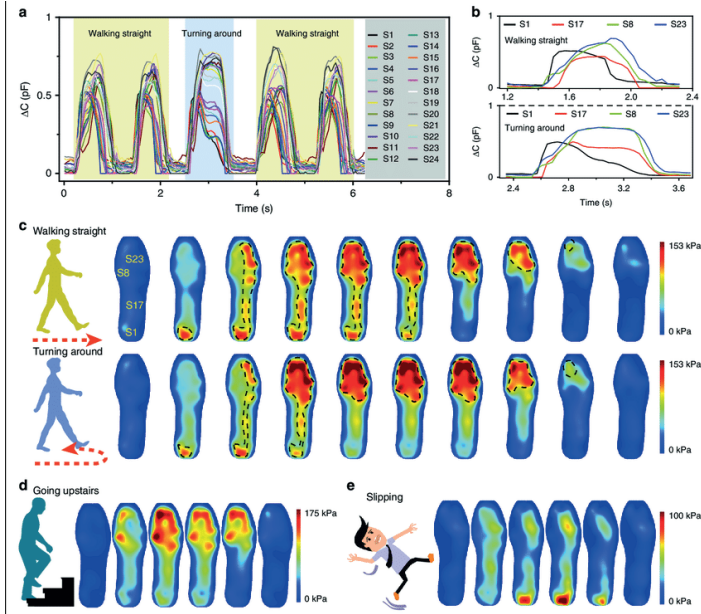
Dinamik pedobarografi, yürüyüş sırasında ayak tabanında oluşan basınç dağılımını değerlendiren bir analiz yöntemidir. Bu ölçümler genellikle yürüyüş platformları veya sensör içeren yürüyüş yolları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Dinamik pedobarografik sistemler yürüyüş siklusu boyunca plantar basınç değişimlerini kaydederek ayak tabanındaki yüklenme paternlerini ortaya koyar.

Bu analiz sayesinde aşağıdaki parametreler değerlendirilebilir:

- peak plantar pressure (PPP)
- pressure–time integral (PTI)
- plantar temas alanı
- yürüyüş sırasında basınç dağılımı
- adım paternleri ve yük transferi

Dinamik analizler özellikle metatars başları ve hallux bölgesinde oluşan yüksek basınç değerlerinin belirlenmesinde önemli bir klinik araç olarak kabul edilmektedir (Armstrong et

al., 1998; van Schie, 2005). Dinamik pedobarografik analizler ayrıca ortotik tabanlıkların ve terapötik ayakkabıların plantar basınç üzerindeki etkilerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).



Şekil 5.1. Farklı yürüyüş görevleri sırasında plantar basınç dağılım paternlerinin karşılaştırmalı şematik gösterimi.

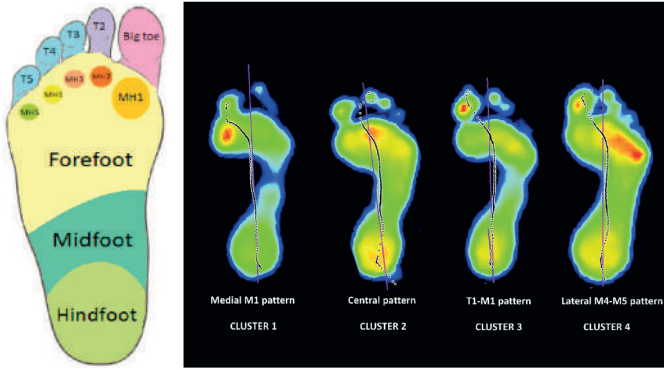
Conceptual illustration based on plantar pressure and gait analysis principles (Perry & Burnfield, 2010; Orlin & McPoil, 2000).

Kırmızı bölgeler yüksek plantar basıncı, mavi bölgeler düşük basıncı göstermektedir.

Şekil: Pedobarografik analizler, yürüyüş sırasında ayak tabanında oluşan basınç dağılımını objektif olarak

değerlendirmeye olanak sağlar. Plantar basınç haritaları, ayak tabanında yüksek yüklenme bölgelerini görsel olarak ortaya koyarak diyabetik ayakta ülser gelişimi açısından riskli alanların belirlenmesine yardımcı olur.

Pedobarografik ölçümlerde plantar basınç genellikle renk skalası ile gösterilir. Düşük basınç bölgeleri mavi ve yeşil tonları ile ifade edilirken, yüksek basınç bölgeleri sarı, turuncu ve kırmızı renklerle gösterilmektedir. Özellikle kırmızı renk ile temsil edilen bölgeler artmış mekanik yüklenmenin göstergesi olarak kabul edilir



Şekil 5.2.. Pedobarografik plantar yük dağılımı ve farklı yüklenme paternlerinin şematik gösterimi

Şematik gösterim. Pedobarografik plantar basınç analizi prensiplerine dayalı olarak hazırlanmıştır (Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010).

Not: Renk skalası plantar basınç yoğunluğunu göstermektedir (kırmızı: yüksek basınç, mavi: düşük basınç).

Pedobarografik analizler, ayak tabanında oluşan plantar basınç dağılımının değerlendirilmesini sağlar. Bu analizlerde ayak tabanı genellikle ön ayak (forefoot), orta ayak (midfoot) ve arka ayak (hindfoot) bölgelerine ayrılarak incelenmektedir.

Basınç haritaları plantar yüzeyde oluşan yük dağılımını renk skalası ile göstermekte olup kırmızı ve sarı tonları yüksek basınç bölgelerini, mavi tonları ise düşük basınç bölgelerini ifade etmektedir. Farklı yürüyüş paternleri veya biyomekanik değişiklikler plantar yük dağılımının farklı bölgelerde yoğunlaşmasına neden olabilir.

5.2.3. Stabilometrik Analiz

Stabilometrik analiz, bireyin ayakta durma sırasında postüral stabilitesini ve denge kontrolünü değerlendirmeye yönelik ölçümler sağlar. Bu analiz yöntemi, ayak tabanı üzerinde oluşan basınç merkezinin (center of pressure – COP) zaman içerisindeki hareketlerinin incelenmesine dayanır. Basınç platformları aracılığıyla gerçekleştirilen stabilometrik ölçümler postüral kontrol mekanizmaları hakkında önemli bilgiler sağlar.

Stabilometrik analizlerde genellikle aşağıdaki parametreler değerlendirilmektedir:

- center of pressure (COP) hareketi
- postüral sway alanı
- sway hızı
- yük transferi
- postüral stabilite

Diyabetik nöropatisi bulunan bireylerde proprioseptif duyunun azalması ve kas kontrolündeki değişiklikler postüral stabilitenin bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle stabilometrik analizler diyabetik ayak hastalarında denge kontrolünün değerlendirilmesi açısından klinik açıdan önemli bilgiler sağlayabilir (van Schie, 2005).

Tablo 5.1. Pedobarografik analiz yöntemleri ve klinik kullanım alanları

Analiz yöntemi	Ölçülen parametreler	Klinik kullanım alanı
Statik pedobarografi	Yük dağılımı, plantar temas alanı	Postür analizi ve yük dağılımının değerlendirilmesi
Dinamik pedobarografi	Plantar basınç paternleri, yük transferi	Yürüyüş biyomekaniğinin değerlendirilmesi
Stabilometrik analiz	COP (Center of Pressure), sway	Postüral stabilite ve denge değerlendirmesi

Kaynak: Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010

Pedobarografik analiz yöntemleri plantar basınç dağılımının değerlendirilmesine olanak sağlar. Statik ve dinamik ölçümler plantar yük paternlerini analiz ederken stabilometrik analiz postüral stabilite ve denge kontrolü hakkında bilgi sağlar.

5.3. Pedobarografik Parametreler

Pedobarografik analizlerde plantar basınç dağılımının değerlendirilmesinde çeşitli parametreler kullanılmaktadır.

5.3.1. Peak Plantar Pressure (PPP)

Peak plantar pressure yürüyüş sırasında ayak tabanının belirli bir bölgesinde oluşan maksimum basınç değerini ifade eder. Diyabetik hastalarda özellikle metatars başları ve hallux bölgesinde artmış peak plantar pressure değerleri ülser gelişimi açısından önemli bir risk faktörü olarak kabul edilmektedir (Armstrong et al., 1998).

5.3.2. Pressure–Time Integral (PTI)

Pressure–time integral plantar yüzeyde oluşan basıncın zaman ile olan ilişkisini ifade eden bir parametredir. Bu ölçüm yalnızca basıncın büyüklüğünü değil aynı zamanda basıncın uygulandığı süreyi de dikkate alır. Uzun süre devam eden yüksek basınç değerleri plantar dokularda hasar gelişimine katkıda bulunabilir (van Schie, 2005).

5.3.3. Temas Alanı (Contact Area)

Temas alanı yürüyüş sırasında ayak tabanının zemine temas eden yüzey alanını ifade eder. Temas alanının artması plantar basıncın daha geniş bir yüzeye dağıtılmasına katkı sağlar. Pedobarografik analizler ortotik müdahalelerin plantar temas alanı üzerindeki etkisini değerlendirmede de kullanılmaktadır (Orlin & McPoil, 2000).

5.3.4. Basınç Dağılımı Paternleri

Pedobarografik analizler plantar basıncın ayak tabanı boyunca nasıl dağıldığını gösterir. Diyabetik hastalarda sıklıkla aşağıdaki bölgelerde basınç artışı gözlenmektedir:

- metatars başları
- hallux
- topuk
- orta ayak

Bu bölgelerde oluşan yüksek plantar basınç değerleri diyabetik ayak ülserlerinin gelişimi ile ilişkilidir (Lavery et al., 2003).

Tablo 5.2. Pedobarografik Parametrelerin Klinik Anlamı

Parametre	Tanım	Klinik Önemi
Peak Plantar Pressure (PPP)	Yürüyüş sırasında ayak tabanının belirli bir bölgesinde ölçülen maksimum basınç değeridir	Yüksek PPP değerleri özellikle metatars başları ve hallux bölgesinde ülser gelişimi riskini gösterir
Pressure-Time Integral (PTI)	Belirli bir plantar bölgede basıncın zaman ile olan ilişkisini ifade eder	Uzun süre devam eden orta düzey basınçlar doku hasarına katkıda bulunabilir
Contact Area	Ayak tabanının zemine temas eden toplam yüzey alanıdır	Temas alanının artması plantar basıncın daha geniş bir yüzeye dağıtılmasını sağlar
Center of Pressure (COP)	Yürüyüş sırasında plantar basınç merkezinin hareket yoludur	COP yolu yürüyüş stabilitesi ve yük transferi hakkında bilgi verir
Load Distribution	Ön ayak, orta ayak ve arka ayak arasındaki yük dağılımıdır	Anormal yük dağılımı belirli bölgelerde yüksek basınç oluşmasına neden olabilir
Step Parameters	Adım uzunluğu, stance süresi ve yük transferi gibi yürüyüş parametreleri	Yürüyüş paternindeki değişiklikler diyabetik nöropatiye bağlı biyomekanik adaptasyonları gösterebilir

Kaynak: Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010

5.4. Pedobarografik Raporun Klinik Yorumlanması

Pedobarografik veriler biyomekanik muayene ve klinik bulgular ile birlikte değerlendirilmelidir.

5.4.1. Basınç Dağılımının Genel Değerlendirilmesi

İlk aşamada plantar basınç haritası incelenerek ayak tabanındaki yük dağılımı değerlendirilir.

5.4.2. Yüksek Basınç Bölgelerinin Belirlenmesi

Diyabetik ayak hastalarında en sık görülen yüksek basınç bölgeleri:

- metatars başları
- hallux
- topuk
- orta ayak

(van Schie, 2005)

Şekil 5.1 Normal plantar basınç dağılımı

Şekil 5.2 Diyabetik ayakta tipik yüksek basınç bölgeleri

Şekil 5.3 Pedobarografik heat map örneği

5.4.3. Yürüyüş Paterninin Değerlendirilmesi

Dinamik pedobarografik analizler yürüyüş sırasında yük transferinin nasıl gerçekleştiğini gösterir.

İncelenen parametreler:

- yük transferi yönü
- adım paternleri
- stance fazı süresi
- COP yolu

5.4.4. Klinik Bulgular ile Karşılaştırma

Pedobarografik veriler şu klinik bulgular ile birlikte değerlendirilmelidir:

- ayak deformiteleri
- kallus bölgeleri
- ülser öyküsü
- eklem hareket açıklığı

5.5.5.Uygun Müdahalenin Planlanması

Tablo 5.3. Pedobarografik bulgulara göre ortotik müdahale seçenekleri

Pedobarografik bulgu	Önerilen ortotik müdahale
Metatars başlarında yüksek basınç	Metatarsal pad
Hallux bölgesinde aşırı yüklenme	Hallux cut-out
Midfoot yüklenmesi	Medial ark desteği
Lateral kolon yüklenmesi	Lateral kama (lateral wedge)

Kaynak: Cavanagh & Bus, 2010; Bus et al., 2020. Pedobarografik analiz sonuçları plantar basınç paternlerini belirlemeye yardımcı olur. Elde edilen bulgular doğrultusunda uygulanan ortotik müdahaleler plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak yüksek basınç bölgelerinde doku stresinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Tablo 5.4. Diyabetik ayakta yüksek riskli plantar bölgeler

Bölge	Risk nedeni
1. metatars başı	Yük transferi
2-3 metatars başı	Basınç yoğunlaşması
Hallux	Propulsiyon yükü
Kalkaneus	Şok yükü

Kaynak: Cavanagh & Bus, 2010; Bus et al., 2020.

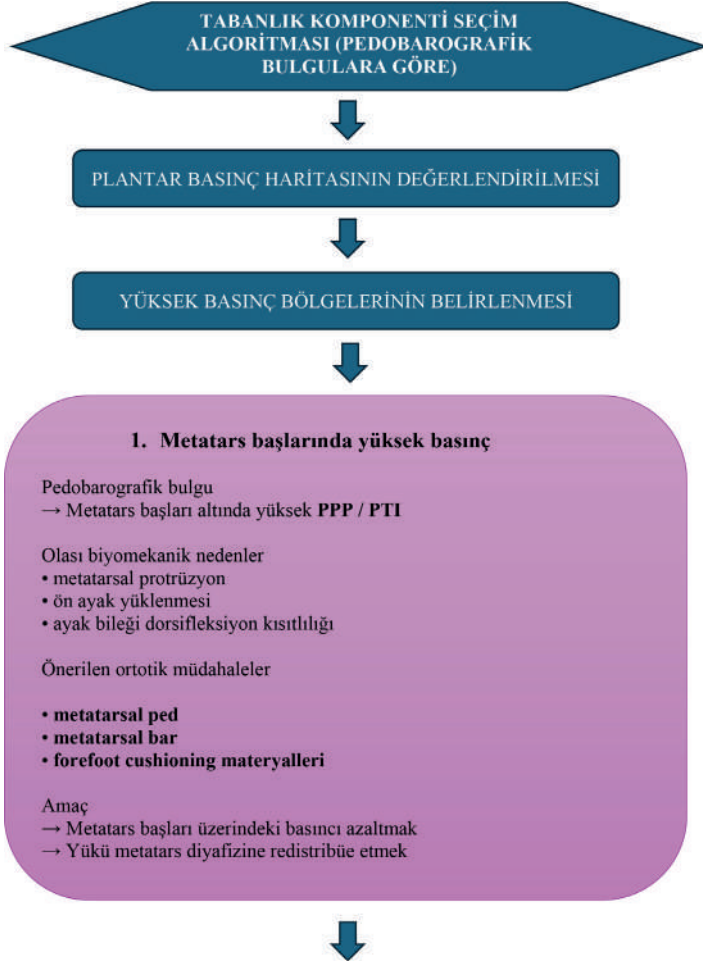


Şekil 5.3. Pedobarografik analiz sonuçlarına dayalı ortotik müdahale planlama algoritması

Kaynak: Literatür doğrultusunda yazar tarafından hazırlanmıştır.

Pedobarografik analiz sonuçlarının sistematik şekilde değerlendirilmesi yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesine ve uygun ortotik müdahalelerin planlanmasına yardımcı olur.

5.4. Tabanlık Komponenti Seçim Algoritması (Pedobarografik Bulgulara Göre)



2. Hallux bölgesinde yüksek basınç

Pedobarografik bulgu

→ Hallux altında yüksek plantar basınç

Olası nedenler

- hallux limitus
- hallux rigidus
- metatars başı yüklenmesi

Önerilen ortotik müdahaleler

- **hallux cut-out**
- **first ray cut-out**
- **forefoot off-loading**

Amaç

→ Hallux üzerindeki lokal basıncı azaltmak



3. Midfoot yüklenmesi

Pedobarografik bulgu

→ Orta ayakta artmış plantar basınç

Olası nedenler

- pes planus
- medial ark çökmesi
- plantar fasya zayıflığı

Önerilen ortotik müdahaleler

- **medial longitudinal arch support**
- **total contact insole**
- **midfoot support**

Amaç

→ Medial ark stabilitesini artırmak
→ plantar temas alanını genişletmek



4. Lateral kolon yüklenmesi

Pedobarografik bulgu

→ Lateral ayak kolonunda yüksek basınç

Olası nedenler

- pes cavus
- rearfoot varus
- lateral ağırlık aktarımı

Önerilen ortotik müdahaleler

- **lateral wedge**
- **lateral posting**
- **shock absorbing materyaller**

Amaç

→ Lateral kolon üzerindeki basıncı azaltmak

→ yük dağılımını dengelemek



5. Topuk bölgesinde yüksek basınç

Pedobarografik bulgu

→ Topuk altında yüksek plantar basınç

Olası nedenler

- heel fat pad atrofisi
- pes cavus
- yüksek topuk yüklenmesi

Önerilen ortotik müdahaleler

- **heel cup**
- **heel cushion**
- **heel pad**

Amaç

→ Topuk şok absorpsiyonunu artırmak

Bu algoritma yazar tarafından literatüre dayalı olarak hazırlanmıştır. Pedobarografik analiz bulgularının klinik değerlendirme ile birlikte yorumlanarak uygun ortotik tabanlık komponentlerinin seçilmesine yardımcı olacaktır. Plantar basınç dağılımının değerlendirilmesi, yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesi ve uygun basınç azaltıcı müdahalelerin planlanması diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Diyabetik Ayakta Off-Loading Prensipieri

6.1. Giriş

Diyabetik ayak ülserlerinin gelişiminde plantar basınç artışı önemli bir rol oynamaktadır. Diyabetik nöropatiye bağlı olarak gelişen duyuusal kayıp nedeniyle hastalar ayak tabanında oluşan mekanik stresleri fark edemeyebilir. Bu durum tekrarlayan mikrotravmalara ve plantar dokularda hasar gelişimine yol açabilir (Cavanagh & Bus, 2010).

Off-loading, plantar yüzeyde oluşan mekanik yükün azaltılması veya yeniden dağıtılması amacıyla uygulanan tedavi yaklaşımlarını ifade eder. Bu yaklaşım diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesi ve tedavisinde temel prensiplerden biri olarak kabul edilmektedir (Bus et al., 2020).

Off-loading uygulamalarının temel amaçları şunlardır:

- plantar basınç azaltılması
- mekanik stresin redistribüsyonu

- yara iyileşmesinin desteklenmesi
- yeni ülser oluşumunun önlenmesi

Bu prensipler diyabetik ayak ülselerinin önlenmesinde ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır (Armstrong et al., 2017).

6.2. Off-Loading Yöntemleri

Diyabetik ayakta off-loading amacıyla farklı tedavi yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemler genel olarak aşağıdaki başlıklar altında incelenebilir:

- terapötik ayakkabılar
- ortotik tabanlıklar
- total contact cast
- removable walker sistemleri

Bu yöntemler plantar basıncın azaltılmasını sağlayarak ülser gelişimi riskini azaltır (Bus et al., 2020).

6.3. Terapötik Ayakkabılar

Terapötik ayakkabılar plantar basınç dağılımını düzenlemek amacıyla tasarlanmış özel ayakkabılardır. Bu ayakkabılar genellikle geniş burun kutusu, yumuşak üst materyaller ve basınç dağıtıcı taban yapıları içermektedir. Terapötik ayakkabılar diyabetik hastalarda plantar basıncın azaltılmasına yardımcı olabilir ve koruyucu tedavi stratejilerinin önemli bir parçası olarak kullanılmaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

6.4. Ortotik Tabanlıklar

Ortotik tabanlıklar plantar basınç redistribüsyonunu sağlamak amacıyla kullanılan kişiye özel cihazlardır. Bu tabanlıklar ayak biyomekaniğini destekleyerek yüksek basınç

bölgelerinde yük azalmasını sağlar. Ortotik tabanlık tasarımında genellikle aşağıdaki komponentler kullanılmaktadır:

- metatarsal ped
- ark desteği
- topuk yastığı
- cut-out bölgeleri

Bu komponentler plantar yük dağılımını değiştirerek yüksek basınç bölgelerinde basıncın azaltılmasına yardımcı olur (Orlin & McPoil, 2000).

Tablo 6.1.. Pedobarografik Bulgulara Göre Ortotik Müdahale Önerileri

Pedobarografik bulgu	Olası biyomekanik neden	Önerilen ortotik komponent
Metatars başlarında yüksek basınç	Ön ayakta yük artışı, metatarsal protrüzyon	Metatarsal pad
Hallux bölgesinde yüksek basınç	Hallux rigidus, push-off sırasında aşırı yüklenme	Hallux cut-out
Midfoot basınç artışı	Medial ark çökmesi (pes planus)	Medial ark desteği
Lateral kolon yüklenmesi	Supinasyon paterni	Lateral wedge
Topuk basınç artışı	Heel strike sırasında artmış yüklenme	Topuk yastığı (heel cushion)
Ön ayakta genel basınç artışı	Ayak bileği dorsifleksiyon kısıtlılığı	Forefoot off-loading
Asimetrik yük dağılımı	Postüral denge bozukluğu	Kişiyi özel tabanlık tasarımı

Kaynak: Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010.

Pedobarografik analizler plantar basınç dağılımının objektif olarak değerlendirilmesine olanak sağlar. Elde edilen veriler yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesine ve uygun ortotik müdahalelerin planlanmasına yardımcı olur. Pedobarografik bulgular ile biyomekanik değerlendirme birlikte ele alındığında, plantar yükün redistribüsyonuna yönelik daha etkili tabanlık tasarımları geliştirilebilir (Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010).

6.5. Total Contact Cast

Total contact cast (TCC), diyabetik ayak ülserlerinin tedavisinde kullanılan etkili off-loading yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ayağın tüm yüzeyi ile temas eden bir alçı uygulamasını içermektedir. Total contact cast, plantar basınçın geniş bir yüzeye dağıtılmasını sağlayarak ülser bölgesindeki mekanik stresi azaltır. Bu nedenle diyabetik ayak ülserlerinin tedavisinde etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Bus et al., 2020).

6.6. Removable Walker Sistemleri

Removable walker sistemleri, ayağın immobilizasyonunu sağlayarak plantar yükün azaltılmasına yardımcı olan cihazlardır. Bu cihazlar özellikle ülser tedavisinde off-loading amacıyla kullanılabilir. Walker sistemleri hastaya çıkarılabilir kullanım imkanı sunmasına rağmen bazı durumlarda hasta uyumu total contact cast uygulamalarına göre daha düşük olabilir.

6.7. Off-Loading ve Tabanlık Tasarımı

Pedobarografik analizler, plantar basınç dağılımının belirlenmesi ve off-loading stratejilerinin planlanmasında önemli bir rol oynar. Yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesi, uygun ortotik komponentlerin seçilmesine yardımcı olur.

Tabanlık tasarımında kullanılan off-loading stratejileri şunları içermelidir:

- metatarsal ped uygulaması
- hallux cut-out
- ark desteği
- topuk yastığı

Bu müdahaleler plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesine katkıda bulunur (Cavanagh & Bus, 2010).

Off-loading, diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesi ve tedavisinde temel bir prensip olarak kabul edilmektedir. Plantar basıncın azaltılması ve yük redistribüsyonunun sağlanması plantar dokular üzerindeki mekanik stresi azaltabilir. Pedobarografik analizler ile desteklenen ortotik müdahaleler, diyabetik ayak yönetiminde etkili koruyucu stratejilerin uygulanmasına yardımcı olur.

Tablo 6.2. Diyabetik Ayakta Off-Loading Yöntemlerinin Klinik Etkinliği

Off-loading yöntemi	Basınç azaltma düzeyi	Klinik kullanım amacı	Avantajları	Sınırlılıkları
Total Contact Cast (TCC)	Çok yüksek	Aktif plantar ülser tedavisi	En etkili basınç azaltma yöntemi, yükün geniş yüzeye dağılımı	Uygulama deneyim gerektirir, hasta mobilitesi sınırlanabilir
Removable Walker	Yüksek	Ülser tedavisi ve off-loading	Uygulaması kolay, çıkarılabilir	Hasta uyumu düşük olabilir
Terapötik ayakkabılar	Orta	Ülser önleme ve koruyucu tedavi	Günlük kullanım için uygun	Basınç azaltma TCC kadar güçlü değildir

Off-loading yöntemi	Basınç azaltma düzeyi	Klinik kullanım amacı	Avantajları	Sınırlılıkları
Ortotik tabanlıklar	Orta	Basınç redistribüsyonu ve risk azaltma	Kişiyeye özel tasarım yapılabilir	Düzenli kullanım gerektirir
Metatarsal ped / cut-out uygulamaları	Lokal yüksek	Spesifik basınç bölgelerini azaltma	Hedefe yönelik basınç azaltma sağlar	Yanlış konumlandırma etkisiz olabilir

Kaynak: Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010.

Diyabetik ayak yönetiminde kullanılan off-loading yöntemlerinin etkinliği uygulanan tedavi yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Total contact cast uygulaması plantar basıncın azaltılmasında en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilirken, ortotik tabanlıklar ve terapötik ayakkabılar özellikle ülser önleme stratejilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Off-loading yöntemlerinin seçimi hastanın klinik durumu, ülser lokalizasyonu ve hasta uyumu gibi faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır (Bus et al., 2020; Armstrong et al., 2017).

Tabanlık Tasarım Prensipleri

7.1. Giriş

Diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde plantar basınç redistribüsyonu önemli bir tedavi hedefidir. Plantar basıncın belirli bölgelerde yoğunlaşması özellikle nöropatisi bulunan diyabetik hastalarda doku hasarına ve ülser gelişimine yol açabilir. Bu nedenle ortotik tabanlıklar diyabetik ayak yönetiminde yaygın olarak kullanılan koruyucu tedavi yöntemleri arasında yer almaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

Tabanlık tasarımının temel amacı plantar basıncın azaltılması ve ayak tabanındaki yük dağılımının daha geniş bir yüzeye yayılmasıdır. Bu yaklaşım plantar dokular üzerindeki mekanik stresi azaltarak ülser gelişimi riskini düşürür (Bus et al., 2020).

Diyabetik ayak için tasarlanan ortotik tabanlıkların temel amaçları şunlardır:

- plantar basıncın azaltılması
- yük redistribüsyonunun sağlanması

- ayak biyomekaniğinin desteklenmesi
- deformitelere bağlı basınç bölgelerinin azaltılması
- şok absorpsiyonunun artırılması

Bu amaçlar doğrultusunda tasarlanan ortotik tabanlıklar diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde önemli bir rol oynar (Cavanagh & Bus, 2010).

7.2. Plantar Basınç Redistribüsyonu

Tabanlıkların tasarımında en önemli biyomekanik prensip plantar basıncın redistribüsyonudur. Redistribüsyon, yüksek basınç bölgelerinde oluşan mekanik yükün ayak tabanının daha geniş bir yüzeyine dağıtılması anlamına gelir.

Plantar basınç redistribüsyonu aşağıdaki mekanizmalar ile sağlanabilir:

- plantar temas alanının artırılması
- yüksek basınç bölgelerinde yükün azaltılması
- yük transferinin değiştirilmesi
- plantar dokuların şok absorpsiyon kapasitesinin artırılması

Bu mekanizmalar plantar dokular üzerindeki mekanik stresin azaltılmasına yardımcı olur (Lavery et al., 2003).

7.3. Kişiyeye Özel Tabanlıkların Tasarımı

Diyabetik ayak için tabanlıkların tasarımında kişiyeye özel yaklaşım büyük önem taşımaktadır. Her hastada ayak morfolojisi, deformiteler ve plantar basınç paternleri farklılık gösterebilir.

Kişiyeye özel tabanlıkların tasarımında aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- ayak yapısı

- deformiteler
- plantar basınç dağılımı
- yürüyüş biyomekanığı
- kallus veya ülser öyküsü

Pedobarografik analizler bu değerlendirme sürecinde önemli bilgiler sağlayarak tabanlık tasarımının optimize edilmesine yardımcı olur (Orlin & McPoil, 2000).

7.4. Tabanlık Materyalleri

Ortotik tabanlıkların etkinliği kullanılan materyaller ile yakından ilişkilidir. Materyal seçimi plantar basınç redistribüsyonu ve şok absorpsiyonu açısından önemli bir faktördür.

Tabanlık üretiminde yaygın olarak kullanılan materyaller şunlardır:

- EVA (ethylene vinyl acetate)
- poliüretan köpükler
- silikon materyaller
- termoplastik materyaller

Bu materyaller plantar basıncın dağıtılmasına ve ayak tabanında oluşan mekanik stresin azaltılmasına yardımcı olur (Bus et al., 2020).

7.5. Tabanlık Tasarımında Klinik Değerlendirme

Tabanlık tasarımında klinik değerlendirme önemli bir rol oynamaktadır. Klinik değerlendirme sırasında aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- ayak deformiteleri
- kallus bölgeleri

- plantar basınç paternleri
- eklem hareket açıklığı
- yürüyüş analizi bulguları

Bu faktörlerin birlikte değerlendirilmesi kişiye özel tabanlık tasarımının planlanmasına yardımcı olur (van Schie, 2005).

Tabanlık uygulamalarının etkinliği klinik değerlendirme ve pedobarografik analizler ile takip edilebilir. Tedavi sonrası yapılan ölçümler plantar basınç dağılımında meydana gelen değişikliklerin değerlendirilmesine yardımcı olur.

Bu yaklaşım aşağıdaki avantajları sağlar:

- tabanlık etkinliğinin değerlendirilmesi
- plantar basınç redistribüsyonunun analiz edilmesi
- gerektiğinde tasarımın modifiye edilmesi

Bu nedenle pedobarografik değerlendirme ortotik tedavi sürecinin önemli bir parçası olarak kabul edilmektedir (Cavanagh & Bus, 2010).

Tabanlık Komponentleri

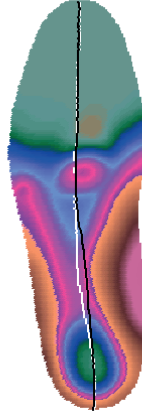
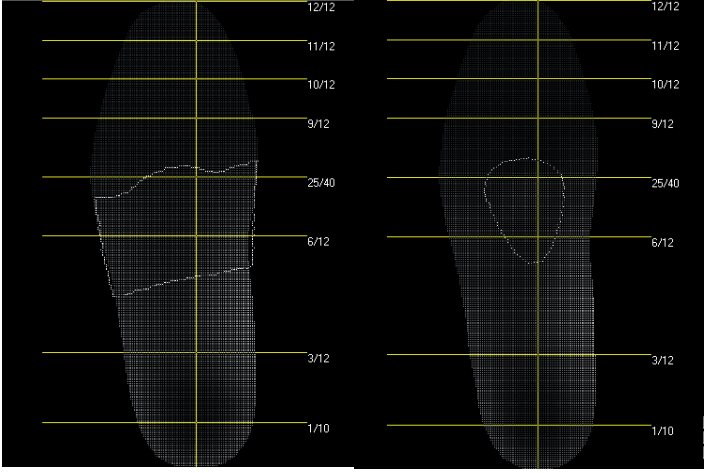
8.1. Giriş

Diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde plantar basıncın azaltılması ve yük dağılımının optimize edilmesi önemli bir rol oynamaktadır. Diyabetik nöropatiye bağlı olarak gelişen duyuusal kayıp, hastaların ayakta oluşan aşırı mekanik yüklenmeyi fark etmesini zorlaştırır. Bu nedenle plantar basıncın belirli bölgelerde yoğunlaşması doku hasarı ve ülser gelişimi açısından önemli bir risk faktörü oluşturur (van Schie, 2005).

Ortotik tabanlıklar, plantar basıncı azaltmak ve yük dağılımını daha dengeli hale getirmek amacıyla kullanılan önemli koruyucu müdahalelerden biridir. Özellikle pedobarografik analizler ile belirlenen yüksek basınç bölgelerine yönelik tasarlanan ortotik elemanlar plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak ülser gelişme riskini azaltabilir (Bus et al., 2019).

8.2. Metatarsal Pad (Metatarsal Ped)

Metatarsal pad, ön ayakta özellikle metatars başları üzerinde oluşan yüksek plantar basıncı azaltmak amacıyla kullanılan ortotik bir elemandır. Ped genellikle metatars başlarının proksimaline yerleştirilir ve yükün metatars başlarından daha proksimal bölgelere dağıtılmasına yardımcı olur. Çeşitli çalışmalar metatarsal pad kullanımının metatars başları üzerindeki plantar basıncı anlamlı derecede azaltabildiğini göstermektedir. Yüksek basıncın görüldüğü metatars bölgesine göre farklı şekillendirilebilir.



Şekil 8.1.. Metatarsal pad uygulaması sonrası plantar basınç dağılımı örnekleri.

Kaynak: Pedobarografik ölçüm sistemi verileri (yazarın klinik arşivi)

Açıklama:

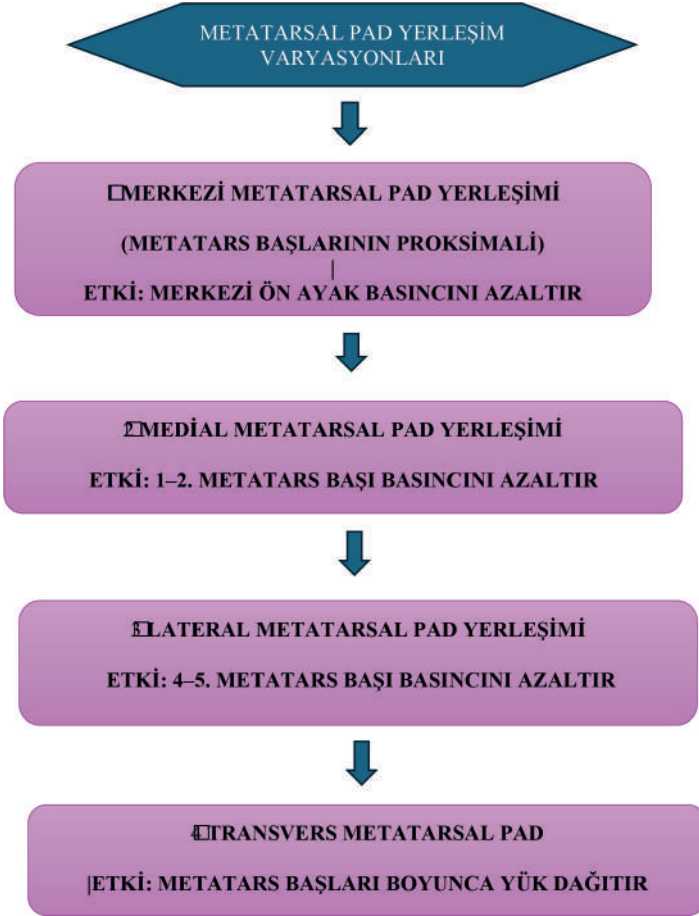
Metatarsal pad metatars başlarının proksimaline yerleştirilerek yükün daha proksimal plantar bölgelere dağıtılmasını sağlar ve metatars başları üzerindeki yüksek plantar basıncı azaltır.

Metatarsal pad özellikle aşağıdaki durumlarda tercih edilir:

- metatarsal head basınç artışı
- metatarsalji
- kallus oluşumu
- ön ayak ülser riski

Pedin yerleşimi ve yüksekliği plantar basınç dağılımını doğrudan etkileyebileceği için klinik değerlendirme ve pedobarografik analiz sonuçlarına göre belirlenmelidir.

Metatarsal pad yerleşimi plantar basınç dağılımını değiştirebilir ve metatars başları üzerindeki yüksek basınç bölgelerinde yük redistribüsyonunu sağlayabilir.



Şekil 8.2. Metatarsal Pad Yerleşim Varyasyonları

Kaynak: Cavanagh & Bus, 2010; Bus et al., 2020

Tablo 8.1. Yüksek basınç bölgeleri ve ülser riski

Bölge	Klinik risk
Hallux	Propulsiyon yükü
1. metatars başı	Yük transferi
2–3 metatars başı	Basınç yoğunlaşması
Kalkaneus	Şok yükü

Kaynak: Orlin & McPoil, 2000; Cavanagh & Bus, 2010.

Plantar basınç analizlerinde özellikle metatars başları, halluks ve kalkaneus bölgelerinde yüksek plantar basınç değerleri saptanabilmektedir. Diyabetik nöropatisi bulunan hastalarda bu bölgelerde tekrarlayan mekanik yüklenmeler doku hasarı ve ülser gelişimi riskini artırabilir. Bu nedenle yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesi, uygun off-loading stratejilerinin ve ortotik müdahalelerin planlanması açısından önem taşımaktadır.

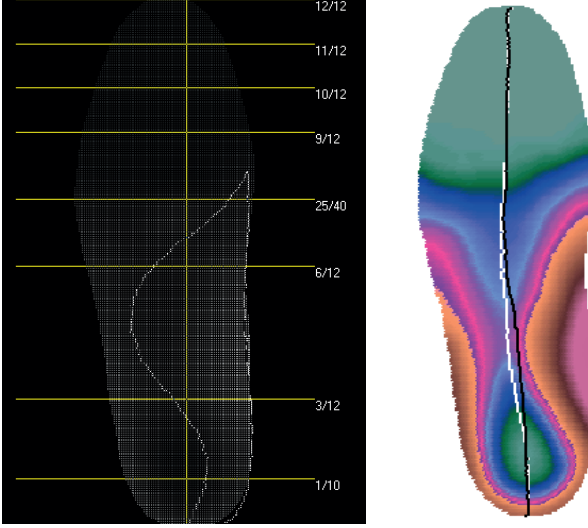
8.3. Arch Support (Medial Longitudinal Ark Desteği)

Medial longitudinal ark desteği, ayak kemerinin desteklenmesi ve yük dağılımının optimize edilmesi amacıyla kullanılan ortotik bir tasarım elemanıdır.

Arch support özellikle aşağıdaki durumlarda tercih edilir:

- pes planus
- midfoot yüklenmesi
- Charcot deformitesi

Ayak arkının desteklenmesi plantar temas alanını artırarak plantar basıncı daha geniş bir yüzeye dağıtır. Bu durum özellikle orta ayak bölgesinde oluşabilecek aşırı yüklenmenin azaltılmasına yardımcı olur (van Schie, 2005).



Şekil 8.3. Medial ark desteği uygulaması ve plantar basınç redistribüsyon örneği

Kaynak: Klinik pedobarografik analiz sistemi çıktısı (yazarın arşivi).

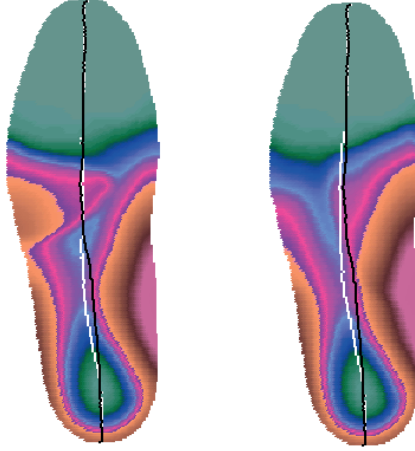
Medial ark desteği plantar temas alanını artırarak plantar basıncın daha geniş bir yüzeye dağıtılmasına yardımcı olur. Bu mekanizma özellikle midfoot bölgesindeki aşırı yüklenmenin azaltılmasına katkı sağlar.

8.4. Forefoot Posting (Ön Ayak Kaması)

Forefoot posting, ön ayağın medial veya lateral tarafındaki yük dağılımını değiştirmek amacıyla kullanılan ortotik bir tekniktir. Bu yöntem özellikle ön ayak biyomekaniğinde görülen varus veya valgus deformitelerinde kullanılmaktadır.

Forefoot posting sayesinde plantar basınç paternleri değiştirilebilir ve yük belirli bölgelerden uzaklaştırılabilir. Bu yöntem özellikle ön ayak basınç dağılımının yeniden

düzenlenmesinde etkili bir ortotik müdahale olarak kabul edilmektedir (Bus et al., 2019).



Şekil 8.4. Ön ayak kaması uygulaması ve ön ayak basıncı redistribüsyon örneği

Kaynak: Klinik pedobarografik analiz sistemi çıktısı (yazarın arşivi).

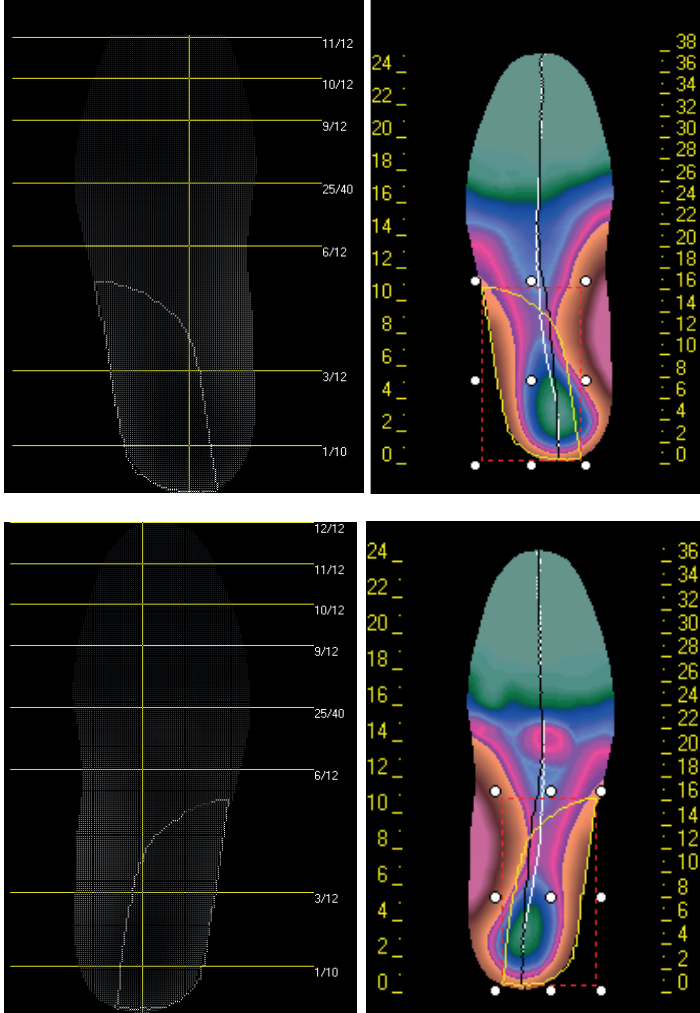
8.5. Rearfoot Wedge (Arka Ayak Kaması)

Rearfoot wedge, arka ayak yük dağılımını değiştirmek amacıyla kullanılan ortotik bir elemandır. Medial veya lateral kama şeklinde tasarlanan bu elemanlar subtalar ekleme biyomekaniğini etkileyerek yük dağılımının yeniden düzenlenmesine yardımcı olur.

Rearfoot wedge aşağıdaki durumlarda kullanılır.

- aşırı pronasyon
- aşırı supinasyon
- medial veya lateral yüklenme paternleri

Arka ayak hizalanmasının düzeltilmesi, yürüyüş sırasında plantar basınç dağılımının daha dengeli hale gelmesine katkı sağlar (van Schie, 2005).



Şekil 8.5. Arka ayak kaması uygulaması ve calcaneal plantar basınç redistribüsyon örneği

Kaynak: Klinik pedobarografik analiz sistemi çıktısı (yazarın arşivi).

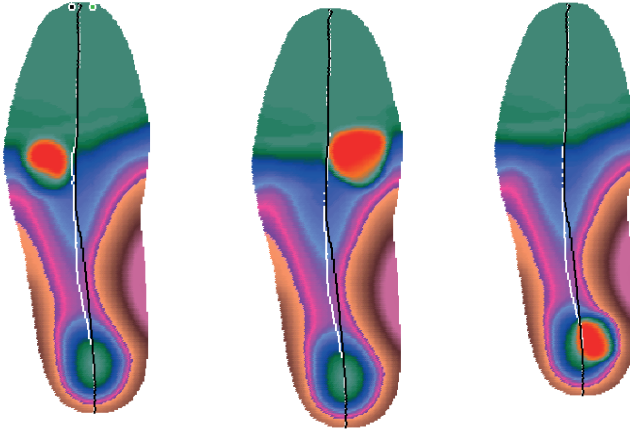
8.6. Cut-out Tasarımları (Off-loading Tasarımları)

Cut-out tasarımları, belirli bir plantar bölgedeki basıncı azaltmak amacıyla tabanlık materyalinin ilgili bölgede çıkarılması veya inceltilmesi ile oluşturulan ortotik müdahalelerdir.

Bu yöntem özellikle aşağıdaki durumlarda kullanılabilir:

- metatars başı ülserleri
- halluks ülserleri
- lokal basınç artışı

Cut-out uygulaması sayesinde basınç doğrudan ülser bölgesinden uzaklaştırılarak çevre dokulara dağıtır. Bu yaklaşım özellikle yüksek basınç bölgelerinde etkili bir off-loading stratejisi olarak kullanılmaktadır (Bus et al., 2019).



Metatarsal cut-out

Hallux cut-out

Calcaneal cut-out

Şekil 8.6. Plantar yüksek basınç bölgelerinde cut-out (off-loading) uygulaması örnekleri

Kaynak: Klinik pedobarografik analiz sistemi çıktısı (yazarın arşivi).

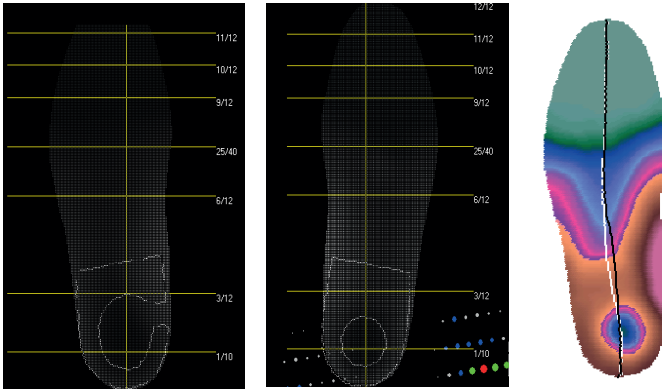
Cut-out uygulaması yüksek plantar basınç bölgelerinde yükün doğrudan temas ettiği alanın ortotik materyalden uzaklaştırılması prensibine dayanır. Bu yaklaşım basıncın çevre dokulara redistribüsyonunu sağlayarak özellikle metatars başları, halluks ve topuk bölgelerinde off-loading stratejisi olarak kullanılır. Cut-out uygulamaları plantar basınç redistribüsyonunu sağlayarak yüksek basınç bölgelerinde doku stresinin azaltılmasına yardımcı olur.

8.7. Heel Cushion ve Heel Lift (Topuk Yastığı ve Topuk Yükseltici Destekler)

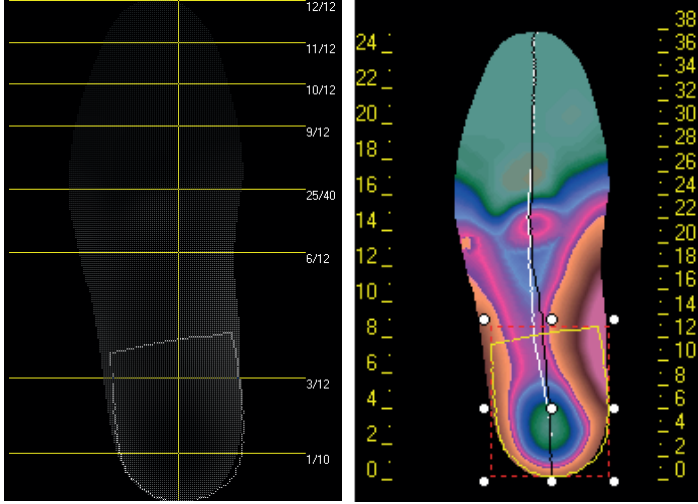
Topuk bölgesinde oluşan basıncı azaltmak amacıyla çeşitli ortotik elemanlar kullanılabilir. Heel cushion, topuk bölgesinde şok absorpsiyonu sağlayarak plantar basıncı azaltmaya yardımcı olur.

Heel lift ise ayak bileği dorsifleksiyonunun kısıtlı olduğu durumlarda kullanılabilir. Özellikle gastroknemius kas kısalığı bulunan bireylerde heel lift kullanımı ön ayakta oluşan basıncı azaltabilir (van Schie, 2005).

(a) Heel cushion



(b) Heel lift



Şekil X. Topuk destek komponentleri:

Kaynak: Pedobarografik analiz sistemi verileri (yazar tarafından hazırlanmıştır).

8.8. Tabanlık Tasarımında Klinik Yaklaşım

Tabanlık tasarımında tek bir ortotik eleman yerine genellikle birden fazla tasarım elemanının kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu tasarım sürecinde aşağıdaki veriler dikkate alınmalıdır:

- biyomekanik muayene
- postür analizi
- yürüyüş analizi
- pedobarografik plantar basınç ölçümleri

Bu değerlendirmeler doğrultusunda oluşturulan kişiye özel ortotik tabanlıklar plantar basıncı azaltarak diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesine katkı sağlar (Bus et al., 2019).

Tablo 8.2. Ortotik tabanlıkların komponentleri ve biyomekanik etkileri

Ortotik komponent	Biyomekanik etki	Klinik kullanım
Metatarsal pad	Metatars başları üzerindeki plantar basıncı azaltır, yükü daha proksimal plantar bölgelere redistribüe eder	Metatars başı ülserleri, metatarsalji, yüksek ön ayak basıncı
Arch support (ark desteği)	Medial arka destekleyerek plantar temas alanını artırır ve basınç dağılımını düzenler	Pes planus, midfoot yüklenmesi
Cut-out (off-loading)	Yüksek basınç bölgesini ortotik materyalden uzaklaştırarak çevre dokulara yük redistribüsyonu sağlar	Lokal plantar basınç artışı, ülser riski olan bölgeler
Heel cushion (topuk yastığı)	Topuk bölgesinde çok absorpsiyonunu artırır ve kalkaneal basıncı azaltır	Kalkaneal ağrı, plantar fasit, topuk basınç artışı
Heel lift (topuk yükseltici)	Ayak bileği dorsifleksiyon ihtiyacını azaltır ve plantar yük dağılımını değiştirir	Gastroknemius kısıtlılığı, aşil tendon gerginliği
Lateral wedge (lateral kama)	Lateral veya medial yük dağılımını değiştirerek subtalar eklemlerini etkiler	Supinasyon paterni, lateral kolon yüklenmesi

Kaynak: Cavanagh & Bus, 2010; Bus et al., 2020; van Schie, 2005.

Ortotik tabanlıkların komponentleri plantar basınç redistribüsyonunu sağlamak ve ayak biyomekaniklerini düzenlemek amacıyla kullanılmaktadır. Pedobarografik analiz bulguları doğrultusunda seçilen uygun ortotik komponentler yüksek basınç bölgelerinde doku stresinin azaltılmasına yardımcı olur.

Tablo 8.3. Diyabetik ayakta sık görülen plantar basınç paternleri ve klinik anlamları

Plantar basınç paterni	Pedobarografik özellik	Olası biyomekanik neden	Klinik önem
Metatars başlarında yüksek basınç	Ön ayakta yoğun basınç alanları	Metatarsal protrüzyon, yağ yastığı incilmesi	Metatars başı ülserleri
Hallux yüklenmesi	Hallux bölgesinde artmış basınç	Hallux rigidus, propulsiyon yüklenmesi	Hallux ülserleri
Midfoot yüklenmesi	Orta ayakta artmış temas alanı	Medial ark çökmesi, Charcot deformitesi	Midfoot ülser riski
Lateral kolon yüklenmesi	Ayağın lateralinde basınç artışı	Supinasyon paterni	Lateral plantar ülser riski
Topuk basınç artışı	Kalkaneal bölgede yüksek basınç	Heel strike yüklenmesi	Kalkaneal ülser riski
Asimetrik yük dağılımı	Sağ-sol basınç farkı	Postüral dengesizlik	Yürüyüş instabilitesi

Kaynak: Cavanagh & Bus, 2010; Bus et al., 2020; Lavery et al., 2003.

Pedobarografik analiz diyabetik ayak hastalarında plantar basınç paternlerinin değerlendirilmesine olanak sağlar. Elde edilen plantar yük dağılımı bulguları, yüksek basınç bölgelerinin belirlenmesine ve ülser gelişimi açısından riskli alanların tespit edilmesine yardımcı olabilir.

Tabanlık Materyalleri

9.1. Giriş

Diyabetik ayak için tasarlanan ortotik tabanlıkların etkinliği yalnızca tasarım prensiplerine değil aynı zamanda kullanılan materyallere de bağlıdır. Tabanlık materyalleri plantar basıncın redistribüsyonunu sağlamak, şok absorbsiyonunu artırmak ve plantar dokular üzerindeki mekanik stresi azaltmak amacıyla kullanılmaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

Materyal seçimi plantar basınç dağılımı, konfor, dayanıklılık ve biyomekanik destek açısından önemli bir faktördür. Diyabetik ayakta kullanılan materyaller genellikle basınç dağılımını optimize eden ve doku üzerindeki mekanik yükü azaltan özelliklere sahip olmalıdır (Bus et al., 2020).

9.2.EVA (Ethylene Vinyl Acetate)

EVA, ortotik tabanlık üretiminde en yaygın kullanılan materyallerden biridir. Hafif yapısı, esnekliği ve iyi şok absorbsiyon özellikleri nedeniyle plantar basınç redistribüsyonunda etkili bir materyal olarak kabul edilmektedir.

EVA materyali farklı sertlik derecelerinde üretilebilmekte ve bu özellik tabanlı tasarımında farklı biyomekanik ihtiyaçlara göre uyarlanmasını mümkün kılmaktadır.

EVA'nın başlıca avantajları şunlardır:

- hafif yapı
- iyi şok absorpsiyonu
- kolay şekillendirilebilir olması
- dayanıklılık

Bu özellikleri nedeniyle EVA, diyabetik ayak için kullanılan ortotik tabanlıkların üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir (Cavanagh & Bus, 2010).

9.3. Plastazote

Plastazote, çapraz bağlı polietilen köpükten oluşan bir materyaldir ve diyabetik ayak tabanlıklarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu materyal özellikle yüksek riskli diyabetik hastalarda tercih edilmektedir.

Plastazote'nin önemli özellikleri şunlardır:

- düşük yoğunluk
- yüksek şok absorpsiyonu
- ısı ile şekillendirilebilir yapı
- basınç redistribüsyonuna katkı

Plastazote materyali hastanın ayağına uyum sağlayarak plantar basınç dağılımını düzenleyebilir ve lokal basınç bölgelerinin azaltılmasına yardımcı olur (Lavery et al., 2003).

9.4.Poron

Poron, poliüretan bazlı bir köpük materyaldir ve özellikle şok absorbsiyon özellikleri nedeniyle ortotik tabanlık üretiminde kullanılmaktadır.

Poron materyali aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- yüksek enerji absorbsiyonu
- basınç dağılımını iyileştirme
- uzun süreli elastikiyet
- deformasyona karşı direnç

Bu özellikleri sayesinde Poron materyali özellikle topuk ve ön ayak bölgelerinde şok absorbsiyonunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Poron materyali plantar dokular üzerindeki mekanik stresin azaltılmasına katkıda bulunur (Bus et al., 2020).

9.5.Poliüretan Materyaller

Poliüretan materyaller ortotik tabanlık üretiminde kullanılan dayanıklı ve elastik materyaller arasında yer almaktadır. Bu materyaller genellikle yüksek dayanıklılık ve iyi mekanik destek özellikleri sunmaktadır.

Poliüretan materyallerin başlıca avantajları şunlardır:

- yüksek dayanıklılık
- elastik yapı
- iyi şok absorbsiyonu
- uzun kullanım ömrü

Bu özellikler poliüretan materyallerin ortotik tabanlık üretiminde tercih edilmesine katkı sağlamaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

9.6. Materyal Seçimi Prensipleri

Tabanlı materyali seçimi hastanın klinik durumu ve biyomekanik ihtiyaçlarına göre yapılmalıdır. Materyal seçimi sırasında aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- plantar basınç dağılımı
- ayak deformiteleri
- hastanın aktivite düzeyi
- şok absorpsiyon ihtiyacı
- materyalin dayanıklılığı

Diyabetik ayakta kullanılan materyaller genellikle plantar basınç redistribüsyonunu sağlayan ve plantar dokular üzerindeki mekanik stresi azaltan özelliklere sahip olmalıdır (Bus et al., 2020).

Sonuç olarak; tabanlı materyalleri ortotik tabanlıkların biyomekanik etkinliğinde önemli bir rol oynamaktadır. EVA, Plastazote, Poron ve poliüretan materyaller plantar basınç redistribüsyonunu sağlamak ve şok absorpsiyonunu artırmak amacıyla kullanılan yaygın materyaller arasında yer almaktadır. Materyal seçimi hastanın biyomekanik ihtiyaçlarına göre planlanmalı ve plantar basınç dağılımını optimize edecek şekilde uygulanmalıdır.

9.1. Tabanlı materyallerinin Karşılaştırılması

Materyal	Şok absorpsiyonu	Dayanıklılık	Klinik kullanım
EVA	Orta-Yüksek	Orta	Genel tabanlı tabanı
Plastazote	Yüksek	Düşük-Orta	Diyabetik riskli ayak
Poron	Çok yüksek	Orta	Topuk ve ön ayak pedleri
Poliüretan	Orta	Yüksek	Uzun süreli kullanım

Tabanlık Üretim Teknikleri

10.1.Giriş

Ortotik tabanlıklar plantar basınç redistribüsyonunu sağlamak ve ayak biyomekaniğini desteklemek amacıyla kullanılan önemli klinik araçlardır. Diyabetik ayak hastalarında kişiye özel tabanlık üretimi plantar basıncın azaltılması ve ülser gelişiminin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Cavanagh & Bus, 2010).

Tabanlık üretimi farklı teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde kullanılan başlıca üretim yöntemleri şunlardır:

- manuel üretim teknikleri
- vakum şekillendirme
- CAD-CAM üretim sistemleri
- 3D baskı teknolojileri

Bu yöntemler farklı avantaj ve sınırlılıklara sahip olmakla birlikte kişiye özel ortotik çözümler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Bus et al., 2020).

10.2 Manuel Üretim Teknikleri

Manuel üretim teknikleri ortotik tabanlık üretiminde uzun yıllardır kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Bu yöntemde hastanın ayağından alınan ölçüler veya negatif kalıplar kullanılarak tabanlık üretimi gerçekleştirilir.

Manuel üretim süreci genellikle aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. ayak ölçüsünün alınması
2. negatif kalıp oluşturulması
3. pozitif model hazırlanması
4. ortotik materyalin şekillendirilmesi
5. tabanlığın son düzenlemelerinin yapılması

Bu yöntem ortotik tasarımın bireysel ihtiyaçlara göre şekillendirilmesine olanak sağlar. Bununla birlikte üretim süreci zaman alıcı olabilir ve operatör deneyimine bağlı değişkenlik gösterebilir.

10.3. Vakum Şekillendirme

Vakum şekillendirme ortotik tabanlık üretiminde kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde termoplastik veya köpük materyaller ısıtılarak hastanın ayak modeline vakum yardımıyla şekillendirilir.

Vakum şekillendirme yönteminin başlıca avantajları şunlardır:

- hızlı üretim süreci
- iyi anatomik uyum
- yüksek tekrarlanabilirlik

Bu teknik özellikle EVA ve benzeri termoplastik materyallerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Vakum

şekillendirme yöntemi ile üretilen tabanlıklar plantar basınç redistribüsyonunun sağlanmasına katkıda bulunabilir (Cavanagh & Bus, 2010).

10.4.CAD-CAM Üretim Sistemleri

CAD-CAM (Computer-Aided Design – Computer-Aided Manufacturing) teknolojileri ortotik tabanlık üretiminde giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu sistemlerde üretim süreci genellikle aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. ayağın dijital olarak taranması
2. bilgisayar ortamında tabanlık tasarımının yapılması
3. CNC cihazları ile üretim gerçekleştirilmesi

CAD-CAM sistemleri yüksek hassasiyet ve üretim tekrarlanabilirliği sağlamaktadır. Ayrıca dijital tasarım sayesinde tabanlık modifikasyonları kolaylıkla yapılabilmektedir (Bus et al., 2020).

Bu teknolojiler özellikle büyük ölçekli ortotik üretim süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır.

10.5.3D Baskı Tabanlıklar

Son yıllarda ortotik tabanlık üretiminde 3D baskı teknolojileri giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem kişiye özel tasarımın hızlı ve hassas şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır.

3D baskı tabanlık üretim süreci genellikle aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. ayağın dijital taranması
2. bilgisayar destekli tasarım
3. 3D yazıcı ile üretim

3D baskı teknolojileri karmaşık geometrilere sahip ortotik tasarımların üretimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca materyal özellikleri üretim sürecinde kontrol edilebildiği için farklı biyomekanik ihtiyaçlara yönelik tasarımlar yapılabilmektedir (Telfer et al., 2017). Bu teknolojinin ortotik üretim alanında gelecekte daha yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

Ortotik tabanlı üretim teknikleri teknolojik gelişmelere paralel olarak çeşitlenmektedir. Geleneksel manuel üretim yöntemleri klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya devam ederken, vakum şekillendirme, CAD-CAM ve 3D baskı teknolojileri ortotik üretim süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu üretim tekniklerinin uygun şekilde kullanılması kişiye özel ortotik çözümlerin geliştirilmesine ve diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesine katkı sağlayabilir.

10.1. Yabanlık Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Üretim yöntemi	Avantaj	Sınırlılık
Manuel üretim	Kişiye özel modifikasyon	Operatöre bağlı
Vakum şekillendirme	Hızlı üretim	Sınırlı tasarım
CAD-CAM	Yüksek hassasiyet	Yüksek maliyet
3D baskı	Karmaşık tasarımlar	Yeni teknoloji

Diyabetik Ayakta Ayakkabı Tasarımı

11.1. Giriş

Diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde uygun ayakkabı kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Diyabetik nöropatisi bulunan bireylerde koruyucu duyu kaybı nedeniyle ayakta oluşan mekanik stresler fark edilmeyebilir ve bu durum plantar dokularda tekrarlayan mikrotravmalara yol açabilir (Boulton et al., 2005).

Uygun ayakkabı tasarımı plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak yüksek basınç bölgelerinde oluşan mekanik yükü azaltabilir. Bu nedenle terapötik ayakkabılar diyabetik ayak yönetiminde önemli koruyucu tedavi yöntemleri arasında yer almaktadır (Bus et al., 2020).

11.2. Terapötik Ayakkabılar

Terapötik ayakkabılar diyabetik ayak hastalarında plantar basıncın azaltılması ve ayak deformitelerine bağlı mekanik stresin azaltılması amacıyla tasarlanmış özel ayakkabılardır.

Terapötik ayakkabıların temel özellikleri şunlardır:

- geniş iç hacim
- yumuşak üst materyaller
- basınç dağıtıcı taban yapısı
- dikişsiz iç yüzey
- tabanlık kullanımına uygun yapı

Bu özellikler ayak deformitelerinin oluşturduğu lokal basınç bölgelerinin azaltılmasına yardımcı olur (Cavanagh & Bus, 2010).

11.3.Rocker Taban Sistemleri

Rocker taban sistemleri yürüyüş sırasında ayağın yere temas paternini değiştirerek plantar basıncın azaltılmasına yardımcı olan özel taban tasarımlarıdır.

Rocker taban tasarımının temel amacı yürüyüş sırasında ön ayak bölgesinde oluşan mekanik yükü azaltmaktır. Bu sistemler özellikle metatars başları üzerinde oluşan basıncın azaltılmasında etkilidir.

Rocker taban sistemleri farklı tiplerde uygulanabilir:

- toe rocker
- forefoot rocker
- double rocker
- heel-to-toe rocker

Bu sistemler yürüyüş sırasında yük transferini değiştirerek plantar basınç paternlerini düzenler (Cavanagh & Bus, 2010).

11.4. Toe Box Genişliği

Toe box, ayakkabının ön kısmında parmakların bulunduğu bölümü ifade eder. Diyabetik ayakkabı tasarımında toe box genişliği önemli bir faktördür.

Dar toe box yapısı aşağıdaki problemlere yol açabilir:

- parmak deformiteleri
- sürtünme ve basınç artışı
- kallus oluşumu
- ülser gelişimi

Bu nedenle terapötik ayakkabılarda toe box bölgesinin geniş ve yüksek olması önerilmektedir. Bu tasarım parmak deformitelerine bağlı lokal basınç bölgelerinin azaltılmasına yardımcı olur (Bus et al., 2020).

11.5. Ayakkabı İç Yapı Özellikleri

Diyabetik ayakkabıların iç yapısı plantar basınç dağılımı açısından büyük önem taşımaktadır. Ayakkabı iç yüzeyinin uygun şekilde tasarlanması lokal basınç ve sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Diyabetik ayakkabıların iç yapı özellikleri şunları içermelidir:

- dikişsiz iç yüzey
- yumuşak astar materyalleri
- tabanlık kullanımına uygun iç hacim
- stabil topuk yapısı

Bu özellikler ayak tabanında oluşan mekanik stresin azaltılmasına ve plantar dokuların korunmasına katkı sağlar (Boulton et al., 2005).

Sonuç olarak; diyabetik ayak yönetiminde uygun ayakkabı tasarımı plantar basınç redistribüsyonunun sağlanması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Terapötik ayakkabılar, rocker taban sistemleri ve uygun toe box tasarımı plantar basıncın azaltılmasına yardımcı olabilir. Ortotik tabanlıklar ile birlikte kullanılan uygun ayakkabılar diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde önemli koruyucu stratejiler arasında yer almaktadır.

Diyabetik Ayakta Yeni Teknolojiler ve Gelecek Perspektifi

12.1.Giriş

Diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesi ve yönetiminde teknolojik gelişmeler giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel klinik değerlendirme yöntemleri biyomekanik analiz ve ortotik müdahaleler için önemli bilgiler sağlamakla birlikte, son yıllarda geliştirilen dijital teknolojiler plantar basınç değerlendirmesinin daha hassas ve sürekli şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Akıllı sensör sistemleri, dijital biyomekanik analiz yöntemleri ve kişiye özel üretim teknolojileri diyabetik ayak yönetiminde yeni yaklaşımların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu teknolojiler plantar basınç paternlerinin daha doğru analiz edilmesini ve bireye özgü koruyucu tedavi stratejilerinin planlanmasını mümkün kılmaktadır (Bus et al., 2020).

12.2.Akıllı Tabanlık Sistemleri

Akıllı tabanlıklar plantar basınç sensörleri içeren ve yürüyüş sırasında oluşan basınç dağılımını gerçek zamanlı olarak ölçebilen teknolojik cihazlardır. Bu sistemler ayakkabı içine yerleştirilen sensörler aracılığıyla plantar basınç değişimlerini sürekli olarak izleyebilir.

Akıllı tabanlık sistemlerinin başlıca avantajları şunlardır:

- plantar basınç dağılımının sürekli izlenmesi
- yüksek basınç bölgelerinin erken tespiti
- hasta geri bildirimini sağlanması
- klinik takip sürecinin desteklenmesi

Bu teknolojiler özellikle yüksek riskli diyabetik hastalarda ülser gelişimi riskinin erken dönemde belirlenmesine yardımcı olabilir. Bazı akıllı tabanlık sistemleri mobil uygulamalar ile entegre çalışarak hastaya veya klinisyene uyarı bildirimleri gönderebilmektedir.

12.3.Basınç Sensörlü Ayakkabılar

Basınç sensörleri içeren ayakkabılar plantar basınç dağılımını değerlendirmek amacıyla geliştirilen bir diğer teknolojik yaklaşımdır. Bu sistemlerde ayakkabı tabanı içerisine yerleştirilen sensörler yürüyüş sırasında oluşan basınç paternlerini kaydedebilmektedir.

Bu teknoloji sayesinde günlük yaşam aktiviteleri sırasında plantar basınç değişimleri analiz edilebilmekte ve yüksek basınç bölgeleri belirlenebilmektedir. Böylece klinik ortam dışında da plantar basınç değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Basınç sensörlü ayakkabı sistemleri diyabetik ayak yönetiminde bireysel risk değerlendirmesi ve koruyucu müdahalelerin planlanması açısından önemli potansiyel sunmaktadır.

12.4. Dijital Biyomekanik Analiz Sistemleri

Dijital biyomekanik analiz sistemleri ayak biyomekaniğinin daha detaylı şekilde değerlendirilmesini sağlayan gelişmiş analiz yöntemleridir. Bu sistemler genellikle aşağıdaki teknolojileri içermektedir:

- 3D ayak tarama sistemleri
- gelişmiş pedobarografi platformları
- hareket analizi sistemleri
- yürüyüş analiz yazılımları

Bu teknolojiler sayesinde ayak morfolojisi, plantar basınç dağılımı ve yürüyüş paternleri daha hassas şekilde analiz edilebilmektedir. Dijital biyomekanik analiz sistemleri ortotik tabanlık tasarımının kişiye özel olarak optimize edilmesine katkı sağlayabilir.

12.5. Yapay Zeka ve Pedobarografik Analiz

Son yıllarda yapay zekâ tabanlı analiz yöntemleri biyomekanik verilerin değerlendirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Yapay zekâ algoritmaları pedobarografik verileri analiz ederek plantar basınç paternlerini sınıflandırabilir ve ülser riski taşıyan bölgeleri otomatik olarak belirleyebilir.

Bu yaklaşım klinik karar verme sürecini destekleyebilir ve büyük veri setlerinin daha hızlı analiz edilmesini sağlayabilir. Yapay zekâ destekli sistemler gelecekte diyabetik ayak risk değerlendirmesinde önemli bir rol oynayabilir.

12.6. Kişiyeye Özel 3D Tabanlık Üretimi

3D baskı teknolojileri ortotik tabanlık üretiminde kişiyeye özel çözümler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde hastanın ayak yapısına tam uyum sağlayan ortotik tasarımlar üretilebilmektedir.

3D baskı teknolojilerinin ortotik üretimde sunduğu avantajlar şunlardır:

- yüksek tasarım hassasiyeti
- karmaşık geometrilerin üretilmesi
- hızlı üretim süreci
- kişiselleştirilmiş biyomekanik tasarım

Bu teknolojiler özellikle pedobarografik veriler ile entegre edildiğinde daha etkili ortotik çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

12.7. Gelecek Perspektifi

Diyabetik ayak yönetiminde teknolojik gelişmelerin önümüzdeki yıllarda daha da önem kazanacağı öngörülmektedir. Sensör teknolojileri, dijital biyomekanik analiz yöntemleri ve yapay zekâ destekli sistemler plantar basınç değerlendirmesinin daha hassas şekilde yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Bu gelişmeler diyabetik ayak ülserlerinin erken dönemde önlenmesine yönelik yeni klinik yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Gelecekte dijital sağlık teknolojileri ile entegre edilen ortotik tedavi yöntemlerinin diyabetik ayak yönetiminde daha yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir

Sonuç ve Klinik Öneriler

Diyabetik ayak ülserleri, diyabetin en ciddi komplikasyonlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu komplikasyonların gelişiminde nöropati, vasküler hastalıklar ve biyomekanik faktörlerin birlikte rol oynadığı bilinmektedir. Plantar basınç artışı özellikle nöropatisi bulunan diyabetik hastalarda doku hasarına ve ülser gelişimine yol açabilmektedir.

Biyomekanik değerlendirme, diyabetik ayakta plantar basınç artışına yol açabilecek mekanik risk faktörlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Postür analizi, yürüyüş analizi ve pedobarografik değerlendirme yöntemleri ayak biyomekanikliğinin objektif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Pedobarografik analizler plantar basınç dağılımının belirlenmesinde önemli bir klinik araçtır. Bu analizler sayesinde yüksek basınç bölgeleri tespit edilebilir ve uygun ortotik müdahaleler planlanabilir. Pedobarografik verilerin klinik muayene bulguları ile birlikte değerlendirilmesi kişiye özel tabanlık tasarımının planlanmasına yardımcı olabilir.

Ortotik tabanlıklar plantar basıncın redistribüsyonunu sağlayarak yüksek basınç bölgelerinde oluşan mekanik yükü azaltabilir. Tabanlık tasarımında kullanılan ortotik

komponentler, uygun materyal seçimi ve üretim teknikleri ortotik tedavinin etkinliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Diyabetik ayak yönetiminde uygun ayakkabı tasarımı da büyük önem taşımaktadır. Terapötik ayakkabılar ve rocker taban sistemleri plantar basıncın azaltılmasına ve yürüyüş sırasında oluşan mekanik stresin düzenlenmesine katkı sağlayabilir.

Diyabetik ayak ülserlerinin önlenmesinde multidisipliner yaklaşım büyük önem taşımaktadır. Biyomekanik değerlendirme, pedobarografik analiz ve uygun ortotik müdahalelerin birlikte kullanılması diyabetik ayak komplikasyonlarının önlenmesine yönelik etkili stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

- Armstrong, D. G., Boulton, A. J. M., & Bus, S. A. (2017). Diabetic foot ulcers and their recurrence. *New England Journal of Medicine*, 376(24), 2367–2375. <https://doi.org/10.1056/NEJMr1615439>
- Boulton, A. J. M., Vileikyte, L., Ragnarson-Tennvall, G., & Apelqvist, J. (2005). The global burden of diabetic foot disease. *The Lancet*, 366(9498), 1719–1724. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)67698-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)67698-2)
- Bus, S. A., Armstrong, D. G., van Deursen, R. W., Lewis, J. E., Caravaggi, C., & Cavanagh, P. R. (2020). IWGDF guideline on offloading foot ulcers in persons with diabetes. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 36(Suppl 1), e3274. <https://doi.org/10.1002/dmrr.3274>
- Cavanagh, P. R., & Bus, S. A. (2010). Off-loading the diabetic foot for ulcer prevention and healing. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 100(5), 360–368. <https://doi.org/10.7547/1000360>
- Kendall, F. P., McCreary, E. K., Provance, P. G., Rodgers, M. M., & Romani, W. A. (2005). *Muscles: Testing and function with posture and pain* (5th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Lavery, L. A., Armstrong, D. G., Wunderlich, R. P., Tredwell, J., & Boulton, A. J. M. (2003). Predictive value of foot pressure assessment as part of a population-

- based diabetes disease management program. *Diabetes Care*, 26(4), 1069–1073. <https://doi.org/10.2337/diacare.26.4.1069>
- Neumann, D. A. (2010). *Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for rehabilitation* (2nd ed.). Mosby.
- Norkin, C. C., & Levangie, P. K. (2016). *Joint structure and function: A comprehensive analysis* (5th ed.). F. A. Davis.
- Orlin, M. N., & McPoil, T. G. (2000). Plantar pressure assessment. *Physical Therapy*, 80(4), 399–409. <https://doi.org/10.1093/ptj/80.4.399>
- Perry, J., & Burnfield, J. M. (2010). *Gait analysis: Normal and pathological function* (2nd ed.). SLACK Incorporated.
- van Schie, C. H. M. (2005). A review of the biomechanics of the diabetic foot. *International Journal of Lower Extremity Wounds*, 4(3), 160–170. <https://doi.org/10.1177/1534734605280587>

Diyabetik Ayakta Biyomekanik Değerlendirme, Pedobarografik Analiz ve Ortotik Tabanlık Tasarımı

Dr. Öğr. Üyesi Ayfer Peker Karatoprak