Kısa Bildiri/Brief Report *Mikrobiyol Bul 2026;60(4):531-538*/doi: 10.5578/mb.20260493

Geliş Tarihi (Received): 05.06.2026 • Kabul Ediliş Tarihi (Accepted): 19.09.2026

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi Kullanılarak Dirençli Dermatofitozda *Trichophyton rubrum*'un *Trichophyton indotineae*'dan Hızlı Ayırt Edilmesi

Rapid Differentiation of *Trichophyton rubrum* from *Trichophyton indotineae* in Resistant Dermatophytosis Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Çağrı ERGİN[1](ID), Oğuzhan BİNGÖL[2](ID), Berna KAVAKÇIOĞLU YARDIMCI[3](ID), Hazal KANDEMİR[4](ID), Murat DURDU[5](ID), Macit İLKİT[2](ID)

[1] Pamukkale Üniversitesi Tıp Fakültesi, Tıbbi Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, Denizli.
[1] *Pamukkale University Faculty of Medicine, Department of Medical Microbiology, Denizli, Türkiye.*

[2] Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi, Tıbbi Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, Mikoloji Bilim Dalı, Adana.
[2] *Çukurova University Faculty of Medicine, Department of Medical Microbiology, Division of Mycology, Adana, Türkiye.*

[3] Pamukkale Üniversitesi Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Denizli.
[3] *Pamukkale University Faculty of Science, Department of Chemistry, Denizli, Türkiye.*

[4] Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü, Çevresel Biyoloji Bölümü, Leiden, Hollanda.
[4] *Leiden University Institute of Environmental Sciences (CML), Department of Environmental Biology, Leiden, The Netherlands.*

[5] Başkent Üniversitesi, Adana Dr. Turgut Noyan Uygulama ve Araştırma Merkezi, Dermatoloji Bölümü, Adana.
[5] *Başkent University Dr. Turgut Noyan Application and Research Center, Department of Dermatology, Adana, Türkiye.*

Makale Atıfı: *Ergin Ç, Bingöl O, Kavakçıoğlu Yardımcı B, Kandemir H, Durdu M, İlkit M. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi kullanılarak dirençli dermatofitozda Trichophyton rubrum'un Trichophyton indotineae'dan hızlı ayırt edilmesi. Mikrobiyol Bul 2026;60(4):531-538.*

ÖZ

Son yıllarda, antifungal ilaçlara dirençli ve tedavi edilmesi zor dermatofit enfeksiyonlarına ilişkin bilimsel veriler hızla artmaktadır. Yüzeyel dermatofit enfeksiyon etkenleri arasındaki en dikkat çekici artış *Trichophyton indotineae*'nın (*Trichophyton mentagrophytes* ITS genotip VIII) sebep olduğu klinik tablodur. *T.indotineae* enfeksiyonları uygun antifungal tedavilere karşılık, dirençli olma ve tekrarlama eğilimi göstermektedir. Ancak saçsız deri ve tırnak dermatofitozlarında dünya genelinde, antifungal direncin nadir olduğu *Trichophyton rubrum* en sık tinea etkeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Öngörülen tedavi protokollerine karşılık, süreklilik gösteren veya tekrarlayan inatçı dermatofit enfeksiyonlarında, etkenin tanımlanması ve antifungal duyarlılık profilinin bilinmesi tedavi sürecinde önemli destektir. Bu aşamada, hızlı testlerin yapılması tedavinin doğru yönetiminde zaman kazandırıcı ve yol göstericidir. Bu çalışmada; inatçı dermatofitozlu hastalardan izole edilen dokuz *T.rubrum* ve sekiz *T.indotineae* izolatının, Fourier dönüşümlü kızılötesi [Fourier-transform infrared (FTIR)] spektroskopisi kullanılarak analiz edilmesi ve hızlı tanımlamada kullanılacak spektral aralıkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Spektrumlar Savitzky-Golay filtresi dönüşümünden sonra, metrik ağırlıklı yöntem kullanılarak

İletişim (Correspondence): *Prof. Dr. Çağrı Ergin, Pamukkale Üniversitesi Tıp Fakültesi, Tıbbi Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, Denizli, Türkiye.* ***Tel (Phone):*** *+90 (258) 296 2491,* ***E-posta (E-mail):*** *cagri@pau.edu.tr*

Manhattan mesafesi yöntemi yardımıyla hiyerarşik sınıflama algoritması yöntemiyle incelenmiştir. En yüksek ayırım performansı 3696–3660 cm^{-1} ve 1689–1676 cm^{-1} bant aralıklarının birlikte değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Spektrumda 3692 cm^{-1} bandında gruplar arasında tam ayrım sağlanmıştır. Çalışmada 1689–1676 cm^{-1} aralığında (daha düzenli veya belirli biçimde paketlenmiş protein yapıları ile yüksek frekanslı β-tabaka bileşenleri olan bölgede) görülen ayrışmanın, iki tür arasındaki proteinlerin yapısal organizasyonu, katlanma düzeni veya hücresel protein kompozisyonunda bulunan farklılıklardan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Çalışmada özellikle 3692 cm^{-1} bandında *T.rubrum* izolatlarında, *T.indotineae* izolatlarına kıyasla daha yüksek sinyal yoğunluğu izlenmesi, bu iki tür arasında hidroksil grubu içeren biyomoleküler yapılar ya da yüzey mikroçevresi açısından ayırt edici bir spektral farklılık bulunduğunu düşündürmüştür. Sonuç olarak, FTIR spektroskopisi ülkemizde sık rastlanan *T.rubrum* izolatlarının, *T.indotineae* izolatlarından hızlı ayrımında kolaylıkla kullanılabilen bir yöntemdir. Farklı dermatofit türlerinin besin gereksinimlerine dayalı invazyon stratejileri sergileyebileceği göz önüne alındığında, elde edilen sonuçları doğrudan belirli besin elementleriyle ilişkilendirmek için FTIR yöntemini elementel analiz teknikleriyle desteklemek gereklidir.

Anahtar kelimeler: *Trichophyton indotineae; Trichophyton rubrum; FTIR.*

ABSTRACT

In recent years, there has been a rapid increase in antifungal-resistant dermatophyte infections. Among these cases, the most striking increase is observed in those caused by *Trichophyton indotineae* (*Trichophyton mentagrophytes* ITS genotype VIII). Infections caused by *T.indotineae* are often resistant and recurrent despite available antifungal treatment options. Nevertheless, the most common cause of dermatophytosis, particularly of skin and nail infections, worldwide is *Trichophyton rubrum* and antifungal resistance has rarely been reported in *T.rubrum* infections. Identification of the causative agent and its resistance profile is important, particularly in recurrent and recalcitrant dermatophyte infections. Therefore, rapid identification tests can save time and lead to successful treatment management. In this study, it was aimed to analyze nine *T.rubrum* and eight *T.indotineae* isolates obtained from patients with recalcitrant dermatophytosis using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and to determine the spectral ranges that can be used for their rapid identification.The spectra were analyzed using a hierarchical classification algorithm with weighted Manhattan distance method after a Savitzky-Golay filter transformation. The highest discrimination performance was achieved by the combined evaluation of 3696–3660 cm^{-1} and 1689–1676 cm^{-1} band ranges. The divergence was observed in the range of 1689–1676 cm^{-1} region, where more regularly or specifically packed protein structures and high-frequency β-sheet components are found. This indicated the differences in the structural organization, folding pattern or cellular protein composition of the proteins between the two species. The higher signal intensity observed in *T.rubrum* strains compared to *T.indotineae* strains, particularly in the 3692 cm^{-1} band, suggested a distinctive spectral difference between the two species in terms of biomolecular structures or surface microenvironment containing hydroxyl groups. In conclusion, FTIR spectroscopy is a method that can be easily used to rapidly differentiate *T.rubrum* from *T.indotineae*, which is frequently isolated in our country. Considering that different dermatophyte species may exhibit invasion strategies based on their nutritional needs, it is necessary to support FTIR with elemental analysis techniques to directly attribute these results to specific nutritional elements.

Keywords: *Trichophyton indotineae; Trichophyton rubrum; FTIR.*

GİRİŞ

Antifungal direnç, son yıllarda dermatofit enfeksiyonlarının tedavisinde karşılaşılan ve küresel ölçekte önemli bir halk sağlığı problemidir. Kontrolsüz ve hatalı antifungal tedavi uygulamalarına ilaveten tedavi sürecinde sıklıkla topikal kortikosteroidlerin kullanımı ile klinik görünümün maskelenmesi, dermatofit enfeksiyonlarında tanının yıllarca gecikmesine ve bazı toplumlarda dirençli dermatofitlerin baskın hale geçmesine yol açmıştır[1]. Bu duru-

mun, *Trichophyton indotineae*'nin (*Trichophyton mentagrophytes* ITS genotip VIII) özellikle Hindistan gibi bazı coğrafyalarda baskın hale gelmesinde ana mekanizma olduğu öne sürülmektedir. Tedavide karşılaşılan başlıca zorluk, *T.indotineae* kökenli olguların tedavisinde terbinafin (TRB)'e karşı görülen dirençten kaynaklanmaktadır[2]. Ülkemizde TRB dirençli *T.indotineae*'nın ilk kez 2023'te bildirilmesinden sonra çok sayıda hastadan TRB dirençli *T.indotineae* izolasyonu yapılmıştır[3-5]. Bu hasta gruplarında *T.indotineae* en sık etkenken, *Trichophyton rubrum* ikinci sırada yer almaktadır[4,5]. İnatçı ve kronik dermatomikoz olgularında TRB dirençli suşların oranlarındaki artış önemli bir sorundur[2]. Antifungal duyarlılık testlerinin zaman alıcı olması ve deneyim gerektirmesi nedeniyle rutin mikrobiyoloji laboratuvarlarında bu mantar grubuna yönelik duyarlılık testleri yapılmamaktadır. Hızlı, ucuz ve standardize dermatofit tanımlama yöntemlerinin kullanılması, TRB direnci kuşkulu izolatlara antifungal duyarlılık testi yapılıp yapılmayacağına karar verilmesinde yardımcı olacaktır.

Fourier dönüşümlü kızılötesi [Fourier-transform infrared (FTIR)] spektroskopisi, mikroorganizmaların hücresel protein, lipit, polisakkarit ve diğer biyomoleküler bileşenlerine ait titreşimsel spektral profillerin hızlı değerlendirilmesine olanak sağlayan analitik bir yöntemdir[6]. Numune hazırlığının zahmetsiz olması, kısa analiz süresi, düşük işletim maliyeti ve yüksek standardizasyon potansiyeli sebebiyle, FTIR spektroskopisi son yıllarda klinik mikrobiyoloji alanında giderek artan bir ilgi görmektedir. Farklı besiyerlerinde üretilen izolatların analizine bağlı olarak, *T.rubrum*'un *T.mentagrophytes*'den FTIR ile ayırt edilebileceğine dair araştırmalar bulunsa da henüz *T.indotineae*'nin ayrımına yönelik veri bulunmamaktadır[7-9].

Bu çalışmada, FTIR spektroskopisi temelli spektral profil analizinin klinik açıdan önem taşıyan *T.indotineae* izolatları ile *T.rubrum* izolatlarının birbirinden ayırt edilmesindeki tanısal uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

GEREÇ ve YÖNTEM

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylandı (Karar no: 08 ve Tarih: 21.04.2026).

Çalışmaya dokuz *T.rubrum* ve sekiz *T.indotineae* izolatı dahil edildi. Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji Anabilim Dalı Laboratuvarında anonimize edilmiş olarak stoklanmış izolatlar, daha önceki araştırmalarda multilokus dizi tiplemesi (MLST) ile – ITS, D1-D2 bölgesine ait geniş alt birim (LSU), β-tubulin (tubb) ve translation elongation factor 1-α (tef-1α) – tanımlanmıştır[4]. *T.rubrum* izolatlarının tür tanımlaması, dördünde MLST kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beş *T.rubrum* ve *T.indotineae* izolatları ise kantitatif polimeraz zincir reaksiyonu ve DermaGenius® testi kombinasyonu ile tanımlanmış, gerekli durumlarda ITS dizilemesi ile doğrulama sağlanmıştır[4,5].

İzolatların kültüründe Borelli'nin laktritmel agarı (BLA) (buğday unu 20–30 g/L, tam inek sütü 200–250 mL, bal 10 g/L, agar 20 g/L, kloramfenikol 250 mg/L ve 1 L distile su) kullanıldı[10,11]. Bir hafta 28 °C'de inkübasyon sonrasında, çok sayıda makrokonidya oluşturan izolatlar (x100 objektif, en az 10 alanda ikiden fazla makrokonidya) 200 µL steril distile su içinde yoğun olacak (McFarland >4) şekilde süspanse edildi. Bu örnekler Pamukkale Üniversitesi Fen Fakültesi Biyokimya Anabilim Dalında FTIR spektroskopisi ile analize alındı.

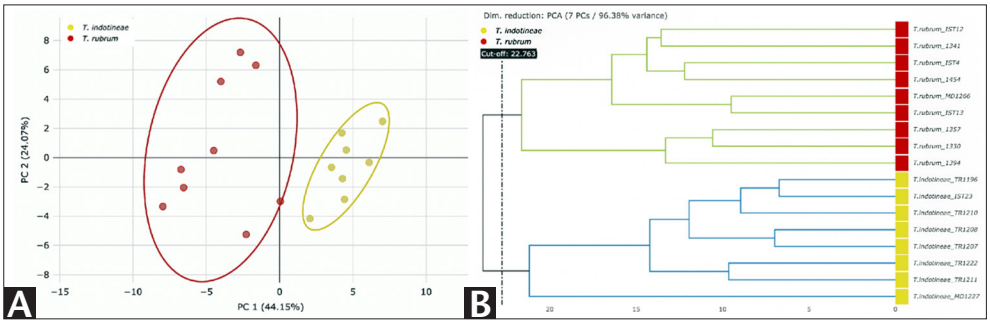
FTIR spektral ölçümlerinde, universal zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) ünitesi ile donatılmış PerkinElmer Spectrum TwoTM FTIR (PerkinElmer U.S. LLC, Connecticut, ABD) spektrometresi kullanıldı. Hazırlanan dermatofit süspansiyonlarından alınan 25 µL hacmindeki örnek doğrudan ATR kristali üzerine uygulanarak spektrumlar elde edildi. Ölçümler öncesinde steril distile suya ait arka plan spektrumu kaydedildi ve örnek spektrumlarından çıkarıldı. Spektral veriler 4000–400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında, 4 cm^{-1} çözünürlükte ve her ölçüm için 32 tarama alınarak toplandı. Ölçümler arasında ATR ünitesine ait elmas kristal yüzey %70 (v/v) etanol ve distile su ile temizlenerek çapraz kontaminasyon riski minimize edildi.

Analiz sonucu elde edilen spektrumlar çevrim içi Clover bioanaliz [(https://platform.clovermsdataanalysis.com/), 2026, Granada, İspanya] programıyla incelendi. Verilere Savitzky-Golay filtresi ile ikinci derece türev uygulandı. İncelemeye alınan veriler için; öncelikle membran lipidlerine ait alifatik gerilme bölgesi (3000–2800 cm^{-1}), proteinlere ait amid I-II bölgesi (1800–1500 cm^{-1}), protein, lipit ve fosfat gruplarını içeren karma biyomoleküler bölge (1500–1200 cm^{-1}), hücre duvarı polisakkaritlerine ait karbonhidrat bölgesi (1200–900 cm^{-1}) ve ayırt edici "parmak izi" (900–700 cm^{-1}) bölgeleri analiz edildi[12]. İkinci aşamada, değişimlerin en yoğun görüldüğü dinamik ara değerler tekli veya çoklu analize eklenerek temel bileşenler analizi (TBA) ile boyutlandırıldı. Farklı TBA aşamaları ile sınıflanmış veriler; kümeler arası metrik ağırlıklı yöntemin kullanıldığı hiyerarşik sınıflama algoritması (HSA) Manhattan metodu ile incelendi[13].

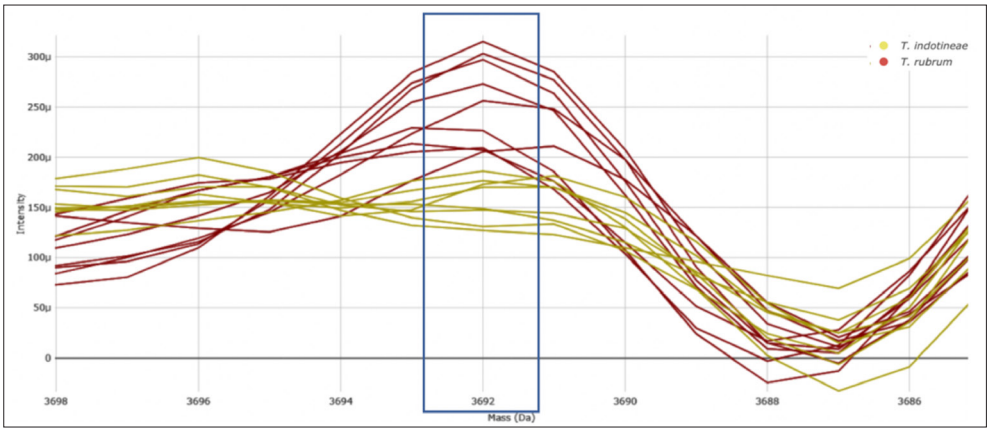
BULGULAR

Çalışmada elde edilen ham FTIR değerlendirmelerinde kullanılan lipit, protein, karma biyomoleküler, polisakkarit ve parmak izi bölgelerinin ayrı ayrı incelenmesi sonucunda da *T.rubrum* ve *T.indotineae* izolatları arasında ayırt edici bir farklılık saptanmamıştır.

Türev işlemi uygulanan spektrumların tekli ve birleşik analizleri sonucunda, TBA ile 3696–3660 cm^{-1} ve 1689–1676 cm^{-1} bant aralıklarının *T.rubrum* ile *T.indotineae* izolatlarını ayırt etmede en yüksek ayırt edici performans gösterdiği saptanmıştır (Şekil 1). HSA sonuçlarına göre türlerle uyumlu iki ana kümenin oluştuğu bulunmuştur.



Şekil 1. *İncelemeye alınan dokuz T.rubrum (kırmızı) ve sekiz T.indotineae (limoni) izolatlarının ayrımında 3696–3660 cm^{-1} ve 1689–1676 cm^{-1} frekanslarının* ***(A)*** *temel bileşenler analizi ve* ***(B)*** *hiyerarşik kümeleme analizi ile değerlendirilmesi.*



Şekil 2. *Savitzky-Golay filtresi uygulanan spektrumlarda 3692 cm-1 bandında T.rubrum serilerinin (kırmızı), T.indotineae serilerine (limoni) göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.*

SDI, mC, SDIxmC ve uygulamalı cut-off değerleri sırasıyla 0.53, 1.00, 0.53 ve 22.76 olarak hesaplanmıştır.

Özellikle 3696–3660 cm^{-1} aralığında yer alan 3692 cm^{-1} bandında *T.rubrum* izolatlarının sinyal yoğunluklarının *T.indotineae* izolatlarına göre belirgin olarak daha yüksek olduğu ve grupları ayırdığı görülmüştür (Şekil 2).

Her bir kökenin FTIR spektroskopi ve analitik değerlendirme süreci 10 dakikanın altında kaydedilmiştir.

TARTIŞMA

Bu çalışma, inatçı ve tekrarlayan dermatofitozlu hastalardan izole edilen *T.indotineae* izolatlarının, toplumumuzda ve dünya genelinde saçsız deri ve tırnak dermatofitozlarında en sık etken olarak görülen *T.rubrum*'dan hızlı ayrımında FTIR spektroskopisinin kullanımını tanımlamıştır. Ülkemizde rutin mikrobiyoloji laboratuvarlarında dermatofit izolatları ile antifungal duyarlılık testi uygulaması çoğunlukla yaygın değildir. Zaman alması, deneyim gerektirmesi ve maliyeti nedeni ile bu testlerin yapılmadığı veya hasta özelinde uygulandığı düşünülebilir. Son yıllarda antifungal direncinin sık görüldüğü *T.indotineae* izolatlarının yaygınlaşması ve tedavi sorunları, antifungal duyarlılık testinin gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Bu araştırmada sunulan FTIR spektroskopi yönteminin hızlı, ucuz ve sonuç değerlendirmesinin kolay olması bu yöntemin avantajlarıdır.

Temel olarak FTIR spektroskopisi ortamda bulunan moleküllerin farklı dalga boyları ile uyarılmaları sonucunda ortaya çıkan enerjinin saptanması pratiğine dayanır. FTIR spektroskopisinde tür tanımlama ve klonal dağılımın incelenmesi amacını taşıyan ticari cihazlar genel olarak "parmak izi" (900–700 cm^{-1}) bölgelerine odaklanır. Ancak bu yaklaşım ile tür içi farklılıkların oraya konması hedeflenmez. Sunulan araştırmada da iki tür arasında "parmak izi" bölgesi dışında bulunan 3696–3660 cm^{-1} ve 1689–1676 cm^{-1} bölgelerinde, grup kümeleri arasında farklılıklar saptanmıştır (Şekil 1).

FTIR spektrumunda 1689–1676 cm^{-1} aralığı, proteinlerin yapısal düzenlenmesi hakkında bilgi veren amid I bölgesi içerisinde yer almaktadır. Amid I bandı, protein omurgasında bulunan karbonil (C=O) gruplarının titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, proteinlerin üç boyutlu katlanma biçimlerine oldukça duyarlıdır. Bu nedenle proteinlerin alfa-sarmal, β-tabaka, dönüş (turn) ve ilmek (loop) gibi ikincil yapı unsurlarındaki değişiklikler bu bölgede farklı spektral sinyaller oluşturabilmektedir. Özellikle 1689–1676 cm^{-1} aralığı, daha düzenli veya belirli biçimde paketlenmiş protein yapıları ile yüksek frekanslı β-tabaka bileşenleriyle ilişkilendirilmektedir[14]. Bu nedenle çalışmada söz konusu bölgede görülen ayrışmanın iki tür arasında proteinlerin yapısal organizasyonu, katlanma düzeni veya hücresel protein kompozisyonunda bulunan farklılıklardan kaynaklanabileceğini düşündürmüştür.

Buna karşılık, 3696–3660 cm^{-1} aralığı FTIR spektrumunun yüksek dalga sayısı bölgesinde yer almakta olup çoğunlukla hidroksil (O-H) gruplarına ait titreşimlerle ilişkilendirilmektedir[15]. Hidroksil grupları su moleküllerinde, polisakkaritlerde, bazı protein yan zincirlerinde ve çeşitli organik bileşiklerde yaygın olarak bulunan kimyasal yapılardır. Bu bölgedeki sinyaller, O-H bağlarının kızılötesi ışınım etkisiyle gerilip gevşemesi sırasında oluşmaktadır. Özellikle bağlanmamış veya zayıf hidrojen bağı olan hidroksil grupları bu bölgede daha belirgin pikler oluşturabilmektedir. Bu nedenle söz konusu bant aralığı; örnekte bulunan serbest su miktarı, hücre yüzeyine bağlı hidratasyon tabakası, hücre duvarında yer alan polisakkarit bileşenleri ve bu yapılara eşlik eden iyonik mikroçevredeki değişimler hakkında dolaylı bilgi sağlayabilmektedir. Dolayısıyla bu bölgede gözlenen farklılıklar, iki tür arasında hücre yüzeyi kimyası, su tutma özellikleri veya hidroksil grubu içeren yapısal bileşenlerin dağılımı bakımından değişiklikler bulunduğunu düşündürebilir.

Çalışmada özellikle 3692 cm^{-1} bandında *T.rubrum* izolatlarında *T.indotineae* izolatlarına kıyasla daha yüksek sinyal yoğunluğu izlenmesi, bu iki tür arasında hidroksil grubu içeren biyomoleküler yapılar ya da yüzey mikroçevresi açısından ayırt edici bir spektral farklılık bulunduğunu düşündürmektedir. Nitekim Blechert ve arkadaşları[16], magnezyumun insanlardan izole edilen *T.rubrum* için esansiyel elementlerden biri olduğunu ve magnezyum gibi nütrisyonel elementlerin eksikliğinin deri üzerinde dermatofit kolonizasyonunu sınırlandırabileceğini bildirmiştir. Ayrıca magnezyumun *Trichosporon asahii* gibi bazı maya türlerinde hif evresinin büyümesini artırabildiği gösterilmiş olmakla birlikte, Trichophyton türleri açısından benzer bir veri henüz bildirilmemiştir[17]. Bu bulgular, iyonik çevre farklılıklarının dermatofit biyolojisinde rol oynayabileceğini düşündürmekle birlikte, söz konusu bandın belirli bir elemente, özellikle magnezyuma, doğrudan atfedilebilmesi için FTIR verilerinin elementel analiz yöntemleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

Araştırmada kullanılan FTIR spektroskopisi yönteminin tıbbi mikrobiyoloji alanında kullanımına ilişkin zorluklar da bulunmaktadır. Tekrarlayan spektrumlardaki tutarlılık homojenizasyon ile doğrudan ilişkilidir. Dermatofitlerin hif ve konidya yapıları ise farklı molekülleri barındırır. Yalnızca hif yapıları varlığında homojen yapı daha kolay sağlanabilirken teorik olarak spektrumlarda farklılıklar azalacaktır. Bu çalışmada çeşitliliği sağlamak amacıyla sporulasyonun daha yoğun oluştuğu BLA kullanılmıştır[10].

Bu çalışmadaki en önemli kısıtlılığın, kullanılan teknik altyapının mikrobiyoloji laboratuvarlarında yaygın olarak bulunmaması ve kullanılan besiyeri zorunluluğu olduğu düşünülmüştür. Besiyeri bileşenlerinin yapısına bağlı olarak FTIR spektroskopisinde etkilenebilecek yerlerin saptanması, matris destekli lazer desorpsiyon/iyonizasyon uçuş süresi kütle spektrometrisi gibi diğer kütle spektroskopilerinin rutin uygulamalarına göre daha kolay ve ayırt edicidir. Ek olarak, örnek hazırlama basamaklarında biyokütle yoğunluğu, partikül büyüklüğü, süspansiyon homojenitesi ve ATR kristali üzerindeki yayılım kalınlığı gibi değişkenler spektral yoğunlukları etkileyebilmektedir. Ayrıca ölçüm sırasında kalan nem miktarı ve yüzeyde tutulan su tabakası, özellikle yüksek dalga sayısı bölgesindeki O-H bantlarında varyasyona yol açabilmektedir. Bunun yanında, sınırlı sayıda izolat ile çalışılmış olması ve bağımsız doğrulama veri setinin bulunmaması, elde edilen ayırt edici bant aralıklarının genellenebilirliğini kısıtlamaktadır.

Bu çalışmada, HSA'da çoğunlukla uygulanan Öklidyen yöntemi yerine Manhattan yöntemi tercih edilmiştir. Bunun nedeni, elde edilen ana verilerin Savitzky-Golay filtresi uygulanması sonucu sürekliliğinin kaybolması ve türev verilerinin uç değerleri ortaya çıkarmasıdır. Ağırlıklı ortalamanın kullanımı ise uç değerlerin göz ardı edilmesine olanak sağlamıştır[13]. Bu nedenle, dermatofitlerin FTIR spektroskopisinde makrokonidyalardan kaynaklanan bu önemli farklılıkların ardından gelen değişim verilerinin (türev değerlerinin) göz önüne alınarak değerlendirilmesinin daha uygun olduğunu düşünüyoruz. Bununla birlikte, bulunan 22.7 cut-off değeri yüksek bir değerdir ve tür içi yapısal farklılıkların bu yüksek değere yol açması mümkündür. Daha fazla sayıda izolatın analiz edilerek araştırmanın genişletilerek verinin geçerliliğinin onaylanması gereklidir. *T.indotineae* dışında, *T.rubrum*'dan fenotipik olarak ayrımı zor olan farklı *T.mentagrophytes* genotiplerinin de analize dahil edilmesi, tür içi ve türler arası sonuçların değerlendirilmesinde yararlı olacaktır.

Sonuç olarak, FTIR spektroskopisinin *T.rubrum*'un *T.indotineae*'dan hızlı ayrımında kullanılabileceği ve bu yöntemin özellikle *T.indotineae* gibi antifungal duyarlılık profilinin belirlenmesi önemli olan izolatların dakikalar içinde saptanmasında yardımcı olabileceği gösterilmiştir. *T.indotineae*'nın nütrisyonel element ihtiyaçlarının daha az olabileceği yönündeki bulgular planlanan yeni çalışmalarda yol gösterici olacaktır.

ETİK KURUL ONAYI

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır (Karar no: 08 ve Tarih: 21.04.2026).

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

KAYNAKLAR

1. Burmester A, Tittelbach J, Uhrlass S, Nenoff P, Fabri M, Wiegand C. Rising antifungal resistance in Trichophyton species-the bleak future for treatment of dermatomycosis? Front Microbiol 2026; 17: 1724650. https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1724650

2. Gupta AK, Susmita, Nguyen HC, Liddy A, Economopoulos V, Wang T. Terbinafine resistance in *Trichophyton rubrum* and *Trichophyton indotineae*: A literature review. Antibiotics (Basel) 2025; 14(5): 472. https://doi.org/10.3390/antibiotics14050472

3. Durdu M, Kandemir H, Karakoyun AS, Ilkit M, Tang C, de Hoog S. First terbinafine-resistant *Trichophyton indotineae* isolates with Phe(397)Leu and/or Thr(414)His mutations in Turkey. Mycopathologia 2023; 188(1): 2. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2132702/v1
4. Durdu M, Kandemir H, Karakoyun AS, et al. Clinical and mycological profiles of chronic and recalcitrant dermatophytosis: Turkiye, 2022-2024. Mycopathologia 2026; 191(2): 34. https://doi.org/10.1007/s11046-026-01058-5
5. Durdu M, Kaplan E, Bingöl O, Ünal N, Demircili ME, Spruijtenburg B, et al. Comparison of DermaGenius® and in-house qPCR methods for rapid detection of recalcitrant dermatophyte infections: A practical approach for dermatologists and mycologists. Myoses 2026; 69(6): e70199. https://doi.org/10.1111/myc.70199
6. Lecellier A, Mounier J, Gaydou V, Castrec L, Barbier G, Ablain W, et al. Differentiation and identification of filamentous fungi by high-throughput FTIR spectroscopic analysis of mycelia. Int J Food Microbiol 2014; 168-169: 32-41. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.10.011
7. Ergin Ç, İlkit M, Gök Y, Çon AH, Özel MZ, Kabay N ve ark. *Trichophyton mentagrophytes* ve *Trichophyton rubrum* kökenlerinin FT-IR spektroskopi ile ayrımında Tween-80 etkisi. Mikrobiyol Bul 2014; 48(3): 449-60. https://doi.org/10.5578/mb.7926
8. Ergin Ç, İlkit M, Gök Y, Özel MZ, Çon AH, Kabay N, et al. Fourier transform infrared spectral evaluation for the differentiation of clinically relevant Trichophyton species. J Microbiol Methods 2013; 93(3): 218-23. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2013.03.011
9. Mohammed YF, Salem EZ, Shahin IM, Abdo HM, Emam HE, Fawzy M, et al. Applicability of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in rapid identification of some *Candida* and dermatophyte species infections in humans. Int J Dermatol 2016; 55(10): 1164-71. https://doi.org/10.1111/ijd.4957
10. Ilkit M, Gumral R, Dogen A. Borelli's lactritmel agar induces conidiation in rare-macroconidia producing dermatophytic fungi. Med Mycol 2012; 50(7): 735-9. https://doi.org/10.3109/13693786.2012.680506
11. Kaminski GW. The routine use of modified Borelli's lactritmel agar (MBLA). Mycopathologia 1985; 91(1): 57-9. https://doi.org/10.1007/BF00437289
12. Medeiros AGJ, Nascimento ALF, Rossato L, Santos DA, Peres NTA, Neto RGL, et al. Infrared spectroscopy as a promising tool for diagnosing and typing human pathogenic fungi. Mycoses 2026; 69(1): e70151. https://doi.org/10.1111/myc.70151
13. Gere A. Recommendations for validating hierarchical clustering in consumer sensory projects. Curr Res Food Sci 2023; 6: 100522. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100522
14. Barth A. Infrared spectroscopy of proteins. Biochim Biophys Acta 2007; 1767(9): 1073-101. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2007.06.004
15. Debus RJ. Evidence from FTIR difference spectroscopy that D1-Asp61 influences the water reactions of the oxygen-evolving Mn_4CaO_5 cluster of photosystem II. Biochemistry 2014; 53(18): 2941-55. https://doi.org/10.1021/bi500309f
16. Blechert O, Xiong SZ, Chen JJ, Brand AC, Zhan P. Nutritional requirements of the human pathogenic fungus, *Trichophyton rubrum*, and nutritional immunity of the human skin as barrier against colonization. Fungal Biol Rev 2023; 45: 100330. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2023.100330
17. Aoki K, Yamamoto K, Ohkuma M, Sugita T, Tanaka N, Takashima M. Hyphal growth in Trichosporon asahii is accelerated by the addition of magnesium. Microbiol Spectr 2023; 11(3): e0424222. https://doi.org/10.1128/spectrum.04242-22

Bu eser CC BY-NC Atıf-GayriTicari Türev Eser Yaratma 4.0 Uluslararası Lisansı kapsamında lisanslanmıştır.
Veri Paylaşım Beyanı: Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler, makul talepler doğrultusunda sorumlu yazardan temin edilebilir.
©Telif Hakkı 2026 Mikrobiyoloji Bülteni'ne aittir. Makale metnine www.mikrobiyolbul.org web sayfasından ulaşılabilir.