

Mikrobiális személyazonosítás

BALLÁNÉ FÜSZTER Erzsébet¹

Az emberi mikrobiom az emberi test összes mikroorganizmusának összességét jelenti, beleértve baktériumokat, vírusokat, gombákat és egyéb mikroorganizmusokat, amelyek a test különböző részeiben/részein élnek.

A bőrrel kapcsolatos baktériumközösségek sokfélesége jóval nagyobb, mint azt korábban gondolták, és a baktériumközösségek összetétele igen nagy fokú variabilitást mutat az egyes személyek között. Számos kutatási eredmény igazolta, hogy a bőrünk felületén élő baktériumközösségek az egyénre jellemzők, ezért logikusan vetődik fel a kérdés, hogy a tárgyakon maradt bőrbaktérium-maradványok felhasználhatók lehetnek-e kriminalisztikai célú azonosításhoz. Egy személy által megérintett tárgy felületén lévő baktériumokat össze lehet-e vetni annak a személynek a bőrén található baktériumközösséggel, akiről feltételezhető, hogy megfogta az adott tárgyat?

A mikrobiális profilalkotás a kriminalisztika egyre jobban fejlődő kutatási területe, aminek eredményeként egyre gyakrabban kerül elő a szakirodalomban a „mikrobiális kriminalisztika” fogalma, mint annak a szakterületnek a megnevezése, amelynek fő feladata az egyének azonosításának, illetve a tárgyakhoz és/vagy környezetekhez való társításának lehetősége a mikrobiális jellemzők (azaz baktériumok, gombák és vírusok) elemzése révén.

A mikrobiom-alapú forenzikus elemzés alkalmazása valós szakértői ügyekben az egyének megbízható megkülönböztetésének elérése érdekében ígéretes eszköznek tűnik, amely különösen akkor lehet hasznos, ha más azonosítási technikák nem tudnak elegendő információkat szolgáltatni.

Kulcsszavak: mikrobiom, egyediség, biometrikus profil, személyazonosítás, viszonylagos állandóság, összehasonlíthatóság

Bevezetés

A mikroorganizmusok szinte mindenütt jelen vannak a Földön, körülvesznek minket, mindenhol jelen lévő közösségeket építenek, és a környezeti feltételekhez szorosan kapcsolódó kölcsönhatásba lépnek egymással.

Az emberi mikrobiom az emberi szervezetre jellemző mikroorganizmusok összességét (mikrobióta) reprezentálja.

A mikrobiom kifejezés Joshua Lederberg (1925–2008) Nobel-díjas amerikai mikrobiológus-genetikustól származik, akinek fő kutatási területe a mikroorganizmusok életközösségeinek, kölcsönhatásainak és genetikai sokszínűségének vizsgálata volt. Az általa az 1950-es évek végén megalkotott gyűjtőfogalom alatt az emberi testben

¹ Professor emerita, Nemzeti Közszerológai Egyetem Rendészettudományi Kar Krimináltechnikai Tanszék, e-mail: Ballane.Fusztter.Erzsebet@uni-nke.hu

és testen élő kommenzalista,² szimbionta³ és patogén⁴ mikroorganizmusok alkotta ökológiai rendszert értjük, ami leegyszerűsítve az emberben és az emberen élő mikroorganizmusok összességét jelenti.⁵ A mikrobiom fogalma napjainkban az átlagember számára is egyre inkább közismertté vált, mivel elsősorban az egészséges életmóddal és a helyes táplálkozási szokásokkal összefüggésben mind gyakrabban találkozhatunk vele. Köztudott, hogy az ember szervezetében és bőrének felszínén igen gazdag, változatos mikroorganizmusokból álló ökoszisztéma él.

Az emberi mikrobiom az emberi test mikroorganizmusainak összességét jelenti, beleértve baktériumokat, vírusokat, gombákat és egyéb mikrobákat, amelyek a test különböző részeiben/részein élnek. Az emberi mikrobiom rendkívül fontos szerepet játszik az egészség fenntartásában és a betegségek elleni védekezésben. A bélrendszerben található baktériumok például részt vesznek az emésztésben, segítik a tápanyagok felszívódását, és hozzájárulnak az immunrendszer megfelelő működéséhez. Az egészséges bőr, száj, húgyutak, hüvely mikroorganizmusainak fő funkciója a patogén kórokozók elleni védelem.

Követve a szervezet bonyolultságát, a szakirodalom külön szokta csoportosítani és vizsgálni az emésztőrendszerben (ezen belül is kiemelten a belekben), a húgy- és légutakban, az egyéb szervekben (száj, szem, fül), a különféle nyálkahártyával borított területeken és a bőrfelszínen élő mikrobák összességét.

A mikrobiom legjelentősebb részét a különféle baktériumok alkotják. Normál baktériumflórának a testfelszínen és a testüregekben állandóan vagy átmenetileg jelen levő, az egészséges szervezetben betegséget nem okozó baktériumok összességét tekintik. Ezek közül a mindennapi életben leginkább a bélflóra fontossága kap hangsúlyt, mivel – köztudottan – az egészségünk számára létfontosságú az egészséges bélflóra, egyensúlyának felborulása súlyos következményekkel járhat. Tankönyvi adatok szerint az egészséges emberi bélflórát felnőtt korban mintegy 400–500 faj alkotja, számuk az emberi sejtek tízszerese, tömegük pedig kb. 1,5–2 kg lenne. A széklet száraz súlyának 40–60 százalékát is a bélflóra baktériumai adják.⁶

Az emberi mikrobiom és a betegségek, köztük az elhízás, a gyulladásos bélbetegségek, az ízületi gyulladás és az autizmus közötti kapcsolatról szóló ismereteink gyorsan bővülnek. Az emberi mintákhoz kapcsolódó mikrobiális közösségek genomjainak DNS-szekvenálásában elért eredmények jelentősen javították a mikrobiom szerkezetének és működésének megértését mind a beteg, mind az egészséges állapotokban.⁷

² Ökológiai fogalom; két faj olyan típusú együttélése, amely az egyik számára közömbös, a másik számára előnyös.

³ Mindkét faj számára előnyös együttélés.

⁴ Betegség tüneteit okozó mikroorganizmus.

⁵ CAVALLI-SFORZA 2008: 724–725.

⁶ GERGELY 2003.

⁷ GILBERT et al. 2018: 392.

A közelmúltban az is bebizonyosodott, hogy az emberi testet benépesítő mikrobiális sejtek közel olyan nagy számban vannak jelen, mint a szomatikus sejtjeink; a baktériumok és az emberi sejtek jelenleg ismert becsült aránya körülbelül 1:3.⁸

Az emberi mikrobiom kialakulása a születéskor kezdődik, és az élet során folyamatosan változik, változatosságát mi sem mutatja jobban, mint hogy csak a bélmikrobiom további 5 000 000 génnel járul hozzá az emberi génnek összességéhez. Ha csak azt vesszük figyelembe, hogy az emberi szervezetben közel 1000 különböző baktériumfaj él, és minden egyes baktériumtörzsnek több ezer gént tartalmazó genomja van, egyértelmű, hogy a testünkben élő mikrobák teljes DNS-tartalma, azaz a mikrobiota sokkal nagyobb genetikai sokféleséget kínál, mint az emberi genom.⁹

Az egészséges felnőtt normál mikroorganizmus-összetétele több tényezőtől függ: az egyén életkorától, nemétől, biológiai adottságain túl befolyásoló tényező még az életmód, a fizikai aktivitás, a dohányzási szokások, az alkoholfogyasztás, a táplálkozás, a mikro- és makrokörnyezet, így az otthon, a munkahely „tisztasági állapota”, de az egyén személyes higiénijának színvonala is. A különböző testrészek mikrobáinak faj/törzs szerinti megoszlása is jelentősen eltér egymástól.

A normál mikrobiom megbomlását és ezzel egy időben kóros fajok vagy törzsek megjelenését leggyakrabban fertőzések, antibiotikus kezelés, hirtelen fellépő környezetszennyezés, gyors életmódváltozás és egyéb zavaró külső körülmények okozhatják.

Mindezek alapján kijelenthető, hogy az ember élete szempontjából létfontosságú mikrobiom hatalmas számú mikroorganizmusból áll, és ezeknek a mikroszkopikus méretű lényeknek a fajbeli és számbeli előfordulása rendkívül nagy változatosságot mutat. Napjainkban világszerte folynak kutatások arra vonatkozólag, hogy egy konkrét egyénre vonatkozóan milyen a mikroorganizmusok faji és törzsi összetétele, az mennyire jellemző az adott személyre, mennyire állandó, és hogy milyen külső és belső körülmények befolyásolják a mikrobiom kvantitatív és kvalitatív jellemzőit. Mivel az antibiotikumok, a különféle antivirális és gombaölő gyógyszerek – sajnos – nemcsak a szervezetet megtámadó kórokozót pusztítják el, hanem a velünk szimbiózisban élő, „segítő” mikroorganizmusokat is, a mikrobiom kutatása a mikrobiológia, az orvostudomány és a gyógyszerkutatások vonatkozásában is szíadunk egyik kiemelkedő tudományos területe lett.

Humán Mikrobiom Projekt

A 2007-ben az Egyesült Államok Nemzeti Egészségügyi Intézetének (United States National Institutes of Health) kutatási kezdeményezésére, a Human Genome Pro-

⁸ SENDER-FUCHS-MILO 2016: 337.

⁹ GILBERT et al. 2018: 392.

ject¹⁰ mintájára indított világméretű Humán Mikrobiom Projekt (Human Microbiome Project) célja az emberi egészséggel és betegségekkel kapcsolatos mikrobióta jobb megértése volt. A kutatásokban alkalmazott új, nagy hatékonyságú molekuláris biológiai módszerekkel igyekeztek részletesen feltérképezni a teljes humán ökoszisztémát, elsősorban annak érdekében, hogy összefüggéseket találjanak a mikrobióta összetétele és az emberi szervezet különböző kóros elváltozásai között.

A 170 millió dolláros projekt, amelyben világszerte több mint 200 kutató (The Human Microbiome Project Consortium) vett részt, első szakaszában alapvetően az emberi mikrobióta azonosítására és jellemzésére összpontosított. A második fázis célja pedig a mikrobák egészségi és betegségállapotokban betöltött szerepének tisztázása volt.¹¹

Az emberi mikrobiom tanulmányozása során kiderült, hogy még az egészséges egyének is jelentősen különböznek egymástól az egyes testtájékok (például bél, bőr, szájüreg, orrlyukak, hüvely stb.) mikroba-összetétele tekintetében. Erre a variabilitásra jelenleg még csak részleges magyarázatokkal szolgál a tudomány, az viszont már ismert, hogy az étrend, a környezet, a gazdaszervezet genetikája és a korai mikrobiális expozíció mind-mind szerepet játszanak benne.

Mivel a bőr az emberi test legnagyobb szerve, amelyet mikroorganizmusok milliói kolonizálnak, amelyek összetételét számos tényező befolyásolja mind endogén, a gazdaszervezettől függő (például nem, életkor, etnikai hovatartozás stb.), mind exogén, a környezettől függő (például étrend, éghajlat, földrajzi viszonyok stb.), a legtöbb tanulmány a bőr baktériumközösségére összpontosított.

Lehetnek-e a mikrobiom vizsgálatának kriminalisztikai vonatkozásai?

A bőrmikrobiom témában folytatott valamennyi kutatás azt állapította meg, hogy a bőrrel kapcsolatos baktériumközösségek sokfélesége jóval nagyobb, mint azt korábban gondolták, és hogy összetételük igen nagy fokú variabilitást mutat az egyes személyek között. Ha viszont igaz az, hogy a bőr baktériumközösségei az egyénre jellemzők, logikusan adódott a kérdés, hogy a tárgyakon maradt bőrbaktérium-maradványok felhasználhatók lehetnek-e kriminalisztikai célú azonosításhoz, vagyis hogy egy személy által megérintett tárgy felületén lévő baktériumokat össze lehet-e vetni annak a személynek a bőrén található baktériumközösséggel, akiről feltételezhető, hogy megfogta az adott tárgyat.

Kezdetben az elért klinikai kutatási eredmények mellett csupán „járulékos” hasznosítási lehetőségként merült fel az a kérdés, hogy a mikrobiom-analízisnek lehet-e

¹⁰ Az 1990 októberében elindított és 2003 áprilisában befejezett Humán Genom Projekt egy olyan nemzetközi tudományos kutatási projekt volt, amelynek célja az ember 23 pár kromoszómájának DNS-ét alkotó bázispárok meghatározása, valamint az emberi genom összes génjének azonosítása, feltérképezése és szekvenálása volt.

¹¹ TURNBAUGH et al. 2007: 804.

kriminalisztikai jelentősége, válhat-e például olyan hasznos személyazonosítási módszerre, mint ahogy a DNS-alapú vizsgálatok váltak napjainkra a bűncselekmények felderítésének és bizonyításának szinte a legfontosabb „csodafegyverévé”.

Napjainkban a „kriminalisztikai mikrobiológia” kialakulásának lehetünk szemtanúi, amiről az mondható el, hogy egy olyan, viszonylag új tudományterület, amely a mikrobiológia és a kriminalisztika metszéspontjából származik. Létrejöttének alapvető feltétele volt az a hihetetlenül gyors fejlődés, ami az elmúlt években ment végbe a DNS szerkezetének vizsgálata és az eredmények kiértékelésére alkalmas számítási módszerek terén. Az új generációs szekvenálási technikák¹² (NGS – Next Generation Sequencing) közelmúltbeli megjelenése hihetetlenül megnövelte a törvényszéki elemzéshez is rendelkezésre álló szekvenálási adatok mennyiségét.¹³

Ugyanakkor ezek az új módszerek nemcsak a szekvenálási adatok előállításához kapcsolódó analitikai költségeket, hanem az elemzés elvégzésének idejét is jelentősen lecsökkentették. Az NGS alkalmazása bármilyen mintából származó teljes DNS-kivonat vizsgálatára alkalmas, lehetővé téve egyrészt egy adott mikroorganizmus teljes genomjának feltárásán túl egész mikrobaközösségek egyidejű vizsgálatát, vagyis az adott mikrobapopuláció teljes feltárását.¹⁴

A kialakulóban levő kriminalisztikai mikrobiológia eddigi eredményeinek, vizsgálati módszereinek és az azok révén nyerhető adatoknak az ismeretében reálisan az vetíthető előre, hogy az egyik legfontosabb alkalmazási területe várhatóan a személyazonosítás lesz.

Személyazonosítás a kriminalisztikában

A személyazonosításnak a kriminalisztikában több szempontból is van jelentősége. A „klasszikus” értelemben vett személyazonosítás kérdése szinte egyidős az emberi társadalommal. Alapvetően azért volt és van rá szükség, hogy meg tudjuk különböztetni az egyik embert a másiktól.

A bűnüldözésben a személy kilétének megállapítása mellett kiemelkedő jelentősége van azoknak a vizsgálatoknak is, amikor egy bűncselekmény helyszínén, vagy akár a sértett vagy a gyanúsított testén, ruházatán, esetleg egy bűncselekmény elkövetésére használt eszközön talált nyomok eredetének a meghatározása a cél. Ezeket a vizsgálatokat tekinthetjük a személyazonosítás speciális formáinak is, mivel ezekben az esetekben annak megállapítása a feladat, hogy ki volt az a személy, akitől az elváltozás (a vérfolt, az ujjnyom stb.) származott, vagyis ki hagyta hátra a nyomot.

A személyazonosítás alapja az a tényként elfogadott filozófiai állítás, hogy minden létező dolog, és mint ilyen, minden személy is, egy és megismételhetetlen.

¹² Speciális, új típusú DNS-vizsgálati módszerek.

¹³ OLIVEIRA-AMORIM 2018: 10377.

¹⁴ BØRSTING-MORLING 2015: 78.

A leginkább biztos eredményt adó személyazonosító eljárások az egyén biometrikus jellemzőinek vizsgálatán alapulnak.

A napjainkban leggyakrabban alkalmazott biometrikus alapú eljárások: a hang/beszéd azonosítása, a kézírás alapján történő személyazonosítás, a járásdinamika vizsgálata, a kéz- és arcgeometria vizsgálata, az arc termográfiai vizsgálata, a retina- és az íriszvizsgálaton alapuló személyazonosítás, a fogazat, az ujj- és tenyérlenyomat alapján történő személyazonosítás, valamint a DNS-profilok összehasonlításán alapuló személyazonosítás.

A fentiek ismeretében feltehető a kérdés, hogy az emberi mikrobiom faji/törzsi összetételének meghatározására irányuló vizsgálatoknak lehet-e kriminalisztikai jelentősége, így például tekinthetők-e a biometrikus személyazonosítás eddig ismeretlen, új módszerének.

A mikrobiom-analízisben rejlő forenzikus lehetőségek

Ahhoz, hogy a fenti kérdésre válaszolni lehessen, a következő szempontokat kell megvizsgálni:

Egyedi-e az emberi mikrobiom összetétele? A mikrobiális sokszínűség mennyire az adott egyén sajátja, kizárható-e annak tetszőleges számú, véletlenszerű megismétlődése? Milyen mértékű a diverzitás az adott egyén testrészei között, és milyen fokú a diverzitás a különböző egyének vonatkozásában?

Időben vizsgálva a kérdést, a baktériumflóra és az egyéb mikrobiális életközösség faji/törzsi összetétele mennyire állandó? Milyen külső vagy belső tényezők hatására lépnek fel benne változások, és az átalakulás folyamata mennyire gyors? A mikrobiom-összetétel utalhat-e például a sértett halála esetén a kiváltó okra, vagy a halál beálltának a helyére és idejére? Ismeretlen holttest esetén nyújthat-e támpontot az elhalt kilétének megállapításához? Testi kontaktust követően a bőrfelület mikrobiái mennyi ideig maradnak meg a személlyel érintkezésbe kerülő tárgyakon, és mennyire állnak ellen a környezeti hatásoknak?

Rendelkezésre állnak-e olyan kriminalisztikai, mikrobiológiai és genetikai vizsgálati módszerek, amelyek alkalmazásával gyorsan és biztosan analizálható egy mikrobiális életközösség összetétele, és a kapott eredmények alkalmasak-e több különböző eredetű mikrobiális közösség vizsgálati eredményének összehasonlítása alapján a véleményalkotásra.

Amíg az emberben és az emberen élő mikroorganizmusok klinikai vizsgálata viszonylag hosszú időre nyúlik vissza az egészségi állapotunkkal való összefüggés miatt, az igazságügyi szakterületeken felmerülő kérdések megválaszolása érdekében történő vizsgálatuk még csak szinte napjainkban kezdődött meg.

A mikrobiom emberi azonosításra való felhasználásának első úttörő gondolatát Fierer és munkatársai vetették fel 2010-ben.¹⁵ Azóta számos tanulmányt publikáltak azzal a céllal, hogy feltárják annak lehetőségét, hogy a bőr mikrobiomját felhasználva az embereket egy tárgyhoz vagy egy helyhez lehet-e kapcsolni, aminek forenzikus szempontból lehet kiemelkedő jelentősége. Ennek érdekében több kutatást végeztek a témában, megválaszolando azt a kérdést, hogy mikrobiológiai elemzéssel lehetséges-e egy személyt különböző megérintett tárgyakhoz, például billentyűzetekhez, számítógépes egerekhez, mobiltelefonokhoz és különböző bűnügyi helyszínekről gyűjtött tárgyakhoz kötni.

2010-ben Fierer és munkatársai mutatták be elsőként a mikrobiom-elemzésben rejlő lehetőségeket a törvényszéki azonosításban. Megmutatták, hogy a bőr mikrobiomjának vizsgálata hogyan használható fel egy személy és egy általa megérintett tárgy összekapcsolására, illusztrálva, hogy az egyén bőre és egy tárgy felülete által szolgáltatott baktériumközösségek összehasonlításával lehetséges az érintett felületek és a tárgyakhoz érő személyek összekapcsolása.

Konkrétan három, egymással összefüggő vizsgálatot végeztek: az első, a „billentyűzetvizsgálat” célja az volt, hogy összehasonlítsa a vizsgálatba bevont három darab személyi számítógép billentyűin található baktériumközösségeket a billentyűzet tulajdonosainak ujjbegyein található baktériumokkal; a második vizsgálat a személyek ujjbegyeiről vett minták „időbeli stabilitásának” értékelésére irányult, amely során a mintákat két héten keresztül részben $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, részben pedig $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tárolták; a harmadik vizsgálat pedig a „számítógépes egér vizsgálata” volt, amely arra irányult, hogy a számítógépes egereken talált baktériumközösségeket összehasonlítták a tulajdonosukon kívül még 270 olyan személy kezéről származó mintákkal, akik bizonyíthatóan soha nem érintették meg a vizsgálat tárgyát képező egereket.

2010-es tanulmányukban a szerzők arról számoltak be, hogy a bőrrel összefüggő baktériumok könnyen kinyerhetők a felületekről, és hogy e mikroorganizmus-közösségek összetétele felhasználható a különböző személyek által használt tárgyak megkülönböztetésére, még akkor is, ha a tárgyakat akár 2 hétig szobahőmérsékleten érintetlenül hagyták. Ezek az elsősorban bőrbaktériumok hosszabb ideig megmaradhatnak az érintett felületeken, mivel sokuk rendkívül ellenálló a környezeti hatásokkal szemben, beleértve a nedvességet, a hőmérsékletet és az UV-sugárzást. Ezért megalapozottnak látszik az a feltevés, hogy a bőrrel kapcsolatos baktériumok átadása révén tartós nyomok maradnak azokon a felületeken és tárgyakon, amelyeket napi tevékenységeink során megérintünk.¹⁶ (Ezért is annyira fontos a megfelelő kézhygiénia nemcsak az egészségügyi dolgozók, hanem minden ember számára!)

A Fierer és társai által tett megállapítások ellenőrzésére/megerősítésére a korábban már említett konzorcium kutatói egy nagyszabású vizsgálatba kezdtek. A 2012-ben megjelentetett referenciatanulmányukban 4788 egészséges felnőtt

¹⁵ FIERER et al. 2010: 6477.

¹⁶ FIERER et al. 2010: 6477.

ember mikrobiomjának a vizsgálatáról számoltak be. Nők esetében 18, férfiak esetében 15 (három hüvelyi hely nélkül) testhelyszínről vett mintát analizáltak. A vizsgálatok során megállapították, hogy az egyes testhelyszínek mikrobiális jellemzője két tényezőből tevődik össze: a mikroorganizmusok fajtabeli variabilitásából és az egyes organizmusok gyakorisági eloszlásából.

Az emberi mikrobiomnak ez a széles körű mintavétele (számos alanyon és testhelyszínen keresztül) biztosította a vizsgálatban részt vett populációhoz tartozó egészséges felnőttek normális mikrobiótájának kezdeti jellemzését. A nagy minta-méret és az ugyanazon egyének több testhelyszínéről történő következetes mintavételezés lehetővé tette a mikrobák közötti, valamint a mikrobiom és a klinikai paraméterek közötti kapcsolatok megértését, amelyek alapján alátámasztottnak vélhető az emberi mikrobiom egyediségének kérdése.

A szerzők hangsúlyozták, hogy az elkövetkezőkben még nagyon sok részletet kell tisztázni: például hogy miként alakul ki az egyén mikrobiótája, és hogy milyen domináns változások jellemzik az életkor előrehaladtával. Az is fontos kérdés lehet, hogy mekkora szerepet játszik a gazdaszervezet immunitása vagy a genetikai jellemzői a diverzitás mintázatainak kialakításában, és hogyan hasonlíthatók össze az egyes populációkban megfigyelt minták a világ más részein megfigyelttel.¹⁷

Az eddigi kutatások eredményei alapján megalapozottnak látszik az a megállapítás, hogy az emberi mikrobiom olyan mikrobákból áll, amelyek az egyénen és az egyénen belül élnek, valamint közvetlenül körülveszik a kérdéses személyt, és hogy a „mikrobiális profilalkotás” kriminalisztikai szempontból hasznos lehet az egyének azonosításában vagy bűnözői tevékenységekkel való összekapcsolásában, a mikrobiom vizsgálatából származó sajátosságok felhasználásával. Elengedhetetlen ezeknek az új ismereteknek az igazságügyi szakértői aspektusból történő vizsgálata annak érdekében, hogy a mikrobiális profilalkotás jövőbeli irányai és lehetséges alkalmazási területei kriminalisztikai alátámasztást is kapjanak.¹⁸

Kijelenthető, hogy a világszerte folyó kutatások mind arra a megállapításra vezettek, hogy a különböző egyének közötti mikrobióta-variáció kellően nagy ahhoz, hogy adottnak tűnjön az egyének megkülönböztethetőségének a lehetősége. Ezen az új kutatási területen a bőr mikrobiomjának elemzése ígéretesnek látszik, mivel, mint már korábban volt róla szó, a bőr az emberi test legnagyobb szerve, egy olyan összetett élő ökoszisztéma, amely a bőr típusától függően változatos mikrobiális közösségeknek ad otthont, amelyeket egyebek mellett a bőr típusa is befolyásol (száraz, nedves és zsíros bőr).¹⁹

A témával foglalkozó valamennyi szakirodalom egyértelműen megállapítja, hogy az egyén bőrmikroba-közösségei szisztematikusan változnak testhelyenként és időben, továbbá hogy az intraperszonális különbségek kisebbek, mint az interperszonálisaké, és olyan nagyfokú térbeli és időbeli változékonyságot mutatnak, hogy

¹⁷ The Human Microbiome Project Consortium 2012: 207–214.

¹⁸ NECKOVIC et al. 2020: 1015.

¹⁹ BASHAN et al. 2016: 259.

ennek mértéke és természete önmagában is fontos paraméter, amely hasznos lehet az egyének egymástól való megkülönböztetésében.

A mikrobiom azonban egy élő ökoszisztéma, és következésképpen az egyes alkotóelemek növekedési üteme és túlélése ingadozásokon megy keresztül. Az étrend változása például alapvetően befolyásolhatja a bél mikrobiális közösségének szerkezetét, az erőteljes tisztítás pedig átmenetileg megváltoztathatja a bőr mikrobiomját. Kutatások azonban kimutatták, hogy mindkét esetben az eredeti mikrobióta és struktúra újra kialakul, amikor az eredeti körülmények visszaállnak.²⁰

A mikrobiális profilalkotás a kriminalisztika egyre jobban fejlődő kutatási területe, aminek eredményeként egyre gyakrabban kerül elő a szakirodalomban a „mikrobiális kriminalisztika” fogalma mint annak a szakterületnek a megnevezése, amelynek fő feladata az egyének azonosításának, illetve a tárgyakhoz és/vagy környezetekhez való társításának lehetősége a mikrobiális jellemzők (azaz baktériumok, gombák és vírusok) elemzése révén.²¹

A mikrobiom-kutatás egy olyan erősen transzdiszciplináris terület, amelynek tanulmányozása molekuláris biológiai, biokémiai, genetikai és statisztikai módszereket és modelleket foglal magában. Az eddigi kutatások kivétel nélkül azt a megállapítást támasztották alá, hogy az egyes embereket egymástól szignifikánsan eltérő fajkból és törzsekből álló mikrobióta jellemzi. A mikrobiom tényként elfogadott egyediségéből egyértelműen következik annak a lehetősége, hogy a vizsgálatuk révén szerzett megállapításoknak lehet és van kriminalisztikai jelentősége.

Elfogadva a korábbi vizsgálatok eredményeit, miszerint az emberi mikrobiom összetétele egyénenként változik, Franzosa és társai 2015-ben végzett kutatásaikban arra a kérdésre kerestek választ, hogy ez a változatosság elegendő-e az egyének egyedi azonosításához nagy populációkon belül, vagy elég stabil-e ahhoz, hogy idővel azonosítani lehessen őket. Ők is arra a következtetésre jutottak, hogy az emberi mikrobiom nagyfokú változatosságot mutat, különös tekintettel a mikrobiális szervezetek testhelyspecifikus ökoszisztémái összetételében és működésében az egészséges egyének között. Emellett kimutatták, hogy az emberi mikrobiom jellemzői jelentős időintervallumokon keresztül stabilan társulhatnak az egyénekhez. Ezek a megfigyelések arra utalnak, hogy az egyének egyedileg és stabilan azonosíthatók egy populáción belül a bennük/rajtuk élő mikrobióták alapján. A felállított mikrobiomprofilok felhasználhatók lehetnek a gyanúsítottak és a helyszínek összekapcsolására, katasztrófák áldozatainak azonosítására és a családi kapcsolatok megállapítására.²²

Mivel – most már kutatásokkal igazoltan – kijelenthető, hogy az emberek bőrén egyedi összetételű mikrobiom található, logikusan következik az a feltételezés, hogy a bőrről a különböző objektumok felületére átvitt „mikrobiótanyomok” az ujjlenyomatokhoz hasonlóan forenzikus markerekként szolgálhatnak-e. Az már elfogadott

²⁰ HANNIGAN et al. 2015: 1515.

²¹ TOZZO et al. 2020: 873.

²² FRANZOSA et al. 2015: 2930.

állításnak számít, hogy az egyének azonosítható mikrobiótanyomokat hagynak a felületeken, azonban még nem kellően ismertek azok a körülmények, hogy ezek a nyomok mennyi ideig maradnak felkutathatók és vizsgálhatók. Ráadásul mivel a bőrmikrobióta idővel változhat, még a tartósan fennmaradó nyomok is elveszíthetik kriminalisztikai potenciáljukat, mivel már nem hasonlítanak az őket hagyó személy mikrobiótájára. A probléma megválaszolása érdekében a City University of Hong Kong kutatói négy évszakon keresztül követték több háztartás tagjainak bőrén található és az általuk használt tárgyak felszínére lerakódott mikrobióta összetételét annak kiderítése végett, hogy milyen időtávlatban áll fenn a lehetősége az egyének és a háztartásaik pontos mikrobióta-alapú megfeleltetésének. A vizsgálat kezdetekor a háztartási felszíni mikrobiótanyomokat 67%-os pontossággal lehetett a megfelelő lakóhoz vagy lakókhoz rendelni, azonban néhány hónap elteltével az azonosíthatóság foka jelentősen csökkent. A kutatók arra a konklúzióra jutottak, hogy a mikrobiótanyomok kétségtelenül potenciális forenzikus értékkel bírnak, azonban az ujjlenyomatokkal ellentétben, hosszú távon nem maradnak fenn változatlan összetételben, és idővel olyan mértékben degradálódhatnak, hogy az egyének azonosításában hasznos jellemzőiket könnyen elveszíthetik.²³

Egy másik fontos megválaszolandó kérdés annak megállapítása, hogy a halál után a bőr mikrobiomjában milyen fokú változások állnak be, mivel ezek a változások elvileg kizáró okai lehetnek egy későbbi mintavétel alapján történő azonosításnak. A szakirodalmi adatok azt mutatják, hogy a mikrobák akár 60 órával a halál beállta után is pontos eszközt jelenthetnek a törvényszéki azonosításhoz, mivel ebben a halál utáni időintervallumban a mikrobiális közösségek még meglehetősen pontosan reprezentálják a halál előtti közösségeket. Ez azt jelenti, hogy abban az esetben adott a lehetősége a bőrmikrobiom-minták vételének akár a holttest hullaházba érkezésekor vagy a boncolás során, ha ismert, hogy a halál óta eltelt idő nem haladta meg a 60 órát.²⁴

Diszkusszió

A vizsgált szakirodalmak egyértelműen megállapították, hogy a bőr mikrobiális közösségei, habár személyre szabottak, szisztematikusan változnak a különböző testtájakon és időben, továbbá hogy az intraperszonális különbségek az idő múlásával kisebbek, mint a interperszonális különbségek. Az egyedi jellemzők olyan nagyfokú térbeli és időbeli változékonyságot mutatnak, hogy e változékonyság mérése és jellege önmagában is hasznos lehet az egyének egymástól való megkülönböztetésében. Mivel a különböző egyének közötti mikrobióta-variáció nagyobb, mint az egyazon egyénen belüli, és az embereknek nagyfokú interperszonális diver-

²³ WILKINS-LEUNG-LEE 2017: 1–9.

²⁴ KODAMA et al. 2019: 791–798.

zitással rendelkező, személyre szabott mikrobiomjuk van, ezek az eltérések elvileg elég nagyok lehetnek ahhoz, hogy megkülönböztessék az egyéneket.²⁵

Mivel több kutatás támasztja alá azt a feltételezést, hogy az egyének személyre szabottan egyedi, időben viszonylag stabil és könnyen átvihető bőrrel kapcsolatos baktériumközösségeket hordoznak, következésképpen ezeket a lerakódott bőrbaktériumokat akár „ujlenyomatokként” is lehetne használni a forenzikus célú azonosításhoz, természetesen a megfelelő időkorlátok figyelembevételével.

Amennyiben a mikrobiológiai elemzés lehetővé teszi az emberek megkülönböztetését az általuk hordozott baktériumok alapján, az hozzájárulhat az egyén azonosításához. Amikor egy személy megérint egy tárgyat, egy speciális bakteriális mintázat kerülhet át az érintett felületre. Az érintkezés során létrejött mikrobiális nyomok genetikai elemzése lehetővé teszi az egyének tárgyakhoz és helyekhez való hozzárendelését. Továbbá, mivel a mikrobiom összetétele információt szolgáltat a gazdaszervezet életmódjáról is, a mikrobiom-alapú elemzés felhasználható lehet további kriminalisztikai célokra is, például olyan valószínűsíthető gyanúsítottak felkutatására és azonosítására, akik egy bűncselekmény helyszínéhez köthetők.²⁶

A mikrobiom-vizsgálat, vagyis a mikrobiomprofilok értékelése főleg azokban az esetekben lehet informatívabb, mint a klasszikus daktiloszkópiai ujjlenyomat-elemzés, amikor a morfológiai sajátosságokon alapuló azonosítás az erősen elmosódott vagy részleges ujjlenyomatok miatt nem végezhető el, és amikor a tradicionális humán DNS STR-tipizálása a kis mennyiségű vagy erősen bomlott minták miatt nem lehetséges.²⁷

Mivel az azonosítási folyamat összehasonlító elemzés formájában hajtható végre, a mikrobiális nyomot a vizsgálat során össze kell hasonlítani egy, a bőr mikrobiális közösségeiből álló referenciamintával annak érdekében, hogy a nyomot az azt hátrahagyó személyhez lehessen kötni.

Az elmúlt néhány évben számos tanulmány foglalkozott az emberi bőr mikrobiomjának időbeli stabilitásával. A vizsgált szakirodalom elég egyértelműen megállapította, hogy a bőr mikrobiális közösségei, noha személyre szabottak, szisztematikusan változnak a különböző testhelyeken és időben, az intraperszonális különbségek az idő múlásával kisebbek, mint a személyközi különbségek, és olyan jelentős térbeli és időbeli változékonyságot mutatnak, hogy ennek a változékonyságnak a mértéke és jellege önmagában is fontos paramétert jelenthet, amely hasznos lehet az egyének egymástól való megkülönböztetésében.²⁸

Kijelenthető tehát, hogy a mikrobiom-alapú forenzikus elemzés alkalmazása valós szakértői ügyekben az egyének megbízható megkülönböztetésének elérése érdekében ígéretes eszköznek tűnik, amely különösen akkor lehet hasznos, ha más azonosítási technikák nem tudnak elegendő információkat szolgáltatni. Mindazonáltal további

²⁵ TOZZO et al. 2020: 873.

²⁶ PHAN et al. 2020: 21–29.

²⁷ ASSENMACHER–FIELDS–CRUPPER 2020: 1310–1314.

²⁸ COSTELLO et al. 2009: 1694–1697.

mélyreható vizsgálatokra lenne szükség ahhoz, hogy igazolni lehessen a mikrobiológiai elemzés hatékony alkalmazhatóságát az emberek azonosítására valós kriminalisztikai körülmények között. Teljesen nyilvánvaló, hogy ezek az eredmények még mindig csak egy olyan kirakós játék darabjai, amely még nem állt össze teljesen.

Szükség van továbbá olyan kutatások végzésére, amelyek azt vizsgálják, hogy a mikrobiom baktérium DNS-e mennyi ideig marad meg, miután lerakódott egy területen. Fontos annak mélyreható vizsgálata, hogy *in vitro* és *in vivo* körülmények között milyen gyorsan és milyen határookra állnak be változások a lerakódott baktérium-ökoszisztémában. További kutatásokat kell végezni annak megállapítására is, hogy milyen hatással vannak egyéb külső és belső tényezők az egyéni mikrobiom rövid és hosszú távú stabilitására.

Felhasznált irodalom

- ASSENMACHER, Daniel M. – FIELDS, Stephen D. – CRUPPER, Scott S. (2020): Comparison of Commercial Kits for Recovery and Analysis of Bacterial DNA from Fingerprints. *Journal of Forensic Sciences*, 65(4), 1310–1314. Online: <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14280>
- BASHAN, Amir et al. (2016): Universality of Human Microbial Dynamics. *Nature*, 534, 259–262. Online: <https://doi.org/10.1038/nature18301>
- BØRSTING, Claus – MORLING, Niels (2015): Next Generation Sequencing and Its Applications in Forensic Genetics. *Forensic Science International: Genetics*, 18, 78–89. Online: <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2015.02.002>
- CAVALLI-SFORZA, L. Luca (2008): Joshua Lederberg 1925–2008. *Cell*, 132(5), 724–725. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2008.02.021>
- COSTELLO, Elizabeth K. et al. (2009): Bacterial Community Variation in Human Body Habitats Across Space and Time. *Science*, 326(5960), 1694–1697. Online: <https://doi.org/10.1126/science.1177486>
- FIBERER, Noah et al. (2010): Forensic Identification Using Skin Bacterial Communities. *PNAS*, 107(14), 6477–6481. Online: <https://doi.org/10.1073/pnas.1000162107>
- FRANZOSA, Eric A. et al. (2015): Identifying Personal Microbiomes Using Metagenomic Codes. *PNAS*, 112(22), E2930–E2938. Online: <https://doi.org/10.1073/pnas.1423854112>
- GERGELY Lajos (2003): *Orvosi mikrobiológia*. Budapest: Alliter Kiadói és Oktatásfejlesztői Alapítvány.
- GILBERT, Jack A. et al. (2018): Current Understanding of the Human Microbiome. *Nature Medicine*, 24, 392–400. Online: <https://doi.org/10.1038/nm.4517>
- HANNIGAN, Geoffrey D. et al. (2015): The Human Skin Double-Stranded DNA Virome. Topographical and Temporal Diversity, Genetic Enrichment, and Dynamic Associations with the Host Microbiome. *mBio*, 6(5), e01578–15. Online: <https://doi.org/10.1128/mBio.01578-15>
- KODAMA, Whitney A. et al. (2019): Trace Evidence Potential in Postmortem Skin Microbiomes: From Death Scene to Morgue. *Journal of Forensic Sciences*, 64(3), 791–798. Online: <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13949>
- NECKOVIC, Ana et al. (2020): Challenges in Human Skin Microbial Profiling for Forensic Science. A Review. *Genes*, 11(9), 1015. Online: <https://doi.org/10.3390/genes11091015>
- OLIVEIRA, Manuela – AMORIM, António (2018): Microbial Forensics: New Breakthroughs and Future Prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(24), 10377–10391. Online: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9414-6>

- PHAN, Katherine et al. (2020): Retrieving Forensic Information About the Donor Through Bacterial Profiling. *International Journal of Legal Medicine*, 134(1), 21–29. Online: <https://doi.org/10.1007/s00414-019-02069-2>
- SENDER, Ron – FUCHS, Shai – MILO, Ron (2016): Are We Really Vastly Outnumbered? Revisiting the Ratio of Bacterial to Host Cells in Humans. *Cell*, 164(3), 337–340. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.01.013>
- The Human Microbiome Project Consortium (2012): Structure, Function and Diversity of the Healthy Human Microbiome. *Nature*, 486, 207–214. Online: <https://doi.org/10.1038/nature11234>
- TOZZO, Pamela et al. (2020): Skin Microbiome Analysis for Forensic Human Identification. What Do We Know So Far? *Microorganisms*, 8(6), 873. Online: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060873>
- TURNBAUGH, Peter J. et al. (2007): The Human Microbiome Project. *Nature*, 449, 804–810. Online: <https://doi.org/10.1038/nature06244>
- WILKINS, David – LEUNG, Marcus H. Y. – LEE, Patrick K. H. (2017): Microbiota Fingerprints Lose Individually Identifying Features Over Time. *Microbiome*, 5, 1–9. Online: <https://doi.org/10.1186/s40168-016-0209-7>

ABSTRACT

Microbial Identification

Erzsébet BALLÁNE FÜSZTER

The human microbiome refers to all the microorganisms in the human body, including bacteria, viruses, fungi and other microbes that live in different parts of the body.

The diversity of bacterial communities associated with the skin is much greater than previously thought, and the composition of bacterial communities shows a high degree of variability between individuals. Numerous research findings have demonstrated that the bacterial communities on the surface of our skin are specific to the individual, so it is logical to ask whether skin bacterial residues left on objects can be used for forensic identification? Can the bacteria on the surface of an object touched by a person be compared with the bacterial community on the skin of the person who is presumed to have touched the object.

Microbial profiling is a growing field of research in forensic science and as a result, the term 'microbial forensics' is increasingly used in the literature as a term for the discipline whose main task is to identify and associate individuals with objects and/or environments through the analysis of microbial characteristics (i.e. bacteria, fungi and viruses).

The use of microbiome-based forensic analysis in real-world expert cases to achieve reliable discrimination of individuals appears to be a promising tool that can be particularly useful when other identification techniques cannot provide sufficient information.

Keywords: microbiome, uniqueness, biometric profile, identification, relative stability, comparability