British Journal of Biology Studies
المجلة البريطانية لدراسات الأحياء
ISSN: 2755-0052
DOI: 10.32996/bjbs
Journal Homepage: www.al-kindipublisher.com/index.php/bjbs

تحليل البصمة المناعية كأداة مستقبلية في التحقيقات الجنائية

العنود مزيد الربيعان[1و2], منى شجاع الحربي[3]
[1] مرمز طبي, وزارة الصحة,الرياض, المملكه العربيه السعودية
[2] قسم العلوم الجانئيه, كلية العلوم, جامعهة الملك سعود, الرياض, المملكه العربيه السعودية
[3] قسم الكيمياء الحيوية, كلية العلوم, جامعه الملك سعود, الرياض, المملكة العربية السعودية

تاريخ استلام البحث: 6202/04/15	تاريخ نشر البحث: 6202/05/05	المجلد: 6	العدد: 2

الملخص:
يشهد علم الأدلة الجنائية تطورا متسارعا نحو استخدام الأنماط الجزيئية الفريدة لتحديد هوية الأفراد، متجاوزاً حدود البصمة الوراثية التقليدية (البصمة الوراثية) أحد الاتجاهات البحثية الحديثة هو ما يعرف بالبصمة المناعية، وهي فكرة تعتمد على أن كل شخص يمتلك تواقيع مناعية فريدة ناتجة عن عملية إعادة الترتيب الجيني التي تنتج ملايين الأنماط المميزة من مستقبلات الخلايا التائية والأجسام المضادة. تشير الدراسات الحديثة إلى أن هذا التنوع المناعي الهائل يكون ما يسمى بالتوقيع المناعي للفرد، وهو فريد بدرجة تشبه أو تفوق البصمة الوراثية. يمكن لهذا التوقيع أن يستخرج باستخدام تقنيات التسلسل الجيني المتقدمة، وتحليل البيانات الحيوية، مما يسمح بتحديد هوية الشخص أو تتبع تعرضه المسبق لمسببات أمراض معينة. يهدف هذا البحث إلى استعراض الأدبيات العلمية الحديثة حول مفهوم البصمة المناعية، واستكشاف إمكان تطبيقها في التحقيقات الجنائية لتحديد الهوية أو الربط بين العينات الحيوية المختلفة (مثل الدم، اللعاب، أو الأنسجة). كما يناقش البحث التحديات الأخلاقية والقانونية المتعلقة باستخدام البيانات المناعية في القضايا الجنائية، بما في ذلك الخصوصية، قابلية التغير الزمني في التوقيع المناعي، والمخاطر الأمنية المرتبطة بتخزين البيانات المناعية للأفراد. يمثل هذا الموضوع خطوة مستقبلية طموحة لدمج علم المناعة التحليلي في منظومة الطب الشرعي، ويوفر رؤية جديدة لمفهوم الهوية البيولوجية تتجاوز الجينات نحو الذاكرة المناعية الفردية.
الكلمات المفتاحية: تحليل البصمة المناعية، التحقيقات الجنائية.

Immune Fingerprinting as a Future Tool in Forensic Investigations

Alanoud Mazyed Alrubayan[1,2], Mona Shujaa Alharbi[3]
[1]Clinical Coder, Ministry of Health, Riyadh, Saudi Arabia
[2]College od Science, Forensic Science Department, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia
[3]Department of Biochemistry, College of Science, King Saud University, P. O. Box 2455, Riyadh 11451, Saudi Arabia

Corresponding Author: Mona Shujaa Alharbi, **E-mail**: Moshujaa@ksu.edu.sa

RECIEVED: 15 April 2026 **PUBLISHED:** 05 May 2026 **DOI:** 10.32996/bjbs.2026.6.2.1

Abstract
The field of forensic science is evolving rapidly toward the use of molecularly unique biological signatures that extend beyond traditional DNA fingerprinting. One emerging concept is Immune Fingerprinting, which is based on the understanding that each individual possesses a unique immune repertoire generated through somatic recombination (V(D)J recombination) of T-cell receptor (TCR) and B-cell receptor (BCR) genes. Recent studies have shown that this immunological diversity forms a personalized and stable Immune Repertoire Signature, potentially as distinctive as the genetic fingerprint. Using next-generation sequencing (NGS) and advanced bioinformatics

(immunosequencing), it is possible to map an individual's immune landscape -providing insights into both personal identification and immune exposure history.This paper aims to review recent advances in immune repertoire analysis, exploring its feasibility as a forensic identification tool capable of linking biological evidence (e.g., blood, saliva, tissue) to specific individuals. Ethical and legal implications are also discussed, particularly regarding privacy concerns, temporal variability, and data protection challenges in the storage of immune-based identifiers. Immune fingerprinting represents a visionary step toward integrating immunological diversity into forensic practice - transforming the concept of biological identity from a static genetic code into a dynamic record of an individual's immune life history.
Keywords: Immune Fingerprinting; Forensic Investigations

مقدمة:

شهد العالم في العصر الحالي العديد من التطورات في جميع مناحي الحياة بفعل ثورة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات، كذلك فإن العالم لم يتوقف عند هذا النوع من التطور، بل شهد نقلة نوعية في مجال الثورة البيولوجية وما أحدثته من تطورات خطيرة في شتى المجالات، ومنها الميدان الجنائي وعالم الإثبات في الجريمة. لذلك سارعت الدول إلى البحث عن وسائل تقنية وحديثة أكثر تطوراً من الأساليب التقليدية من أجل البحث عن الأدلة المادية، التي تكشف عن هذا النوع من الجرائم وقرائنها بحيث تكون أداة لإدانة المتهم أو برائته عن التهم المسندة إليه". (لورنس الحوامدة، 2022، ص391).

سيتناول هذا البحث مجموعة من المحاور، أولها يتحدث عن تطور مفهوم الهوية البيولوجية في الطب الشرعي، وعن حدود البصمة الوراثية التقليدية، يليها ظهور البصمة المناعية وقيمتها الجنائية، أخيرا عن الإطار الأخلاقي والقانوني عند استخدام البصمة المناعية في التحقيقات الجنائية.

يعتبر الطب الشرعي فرع من فروع العلوم الطبية التي تساعد في تحقيق العدالة، وذلك من خلال استخدام تطبيقاته في المجال القانوني والجنائي. ومن هذا الفرع تطور مفهوم جديد يُعرف بالهوية البيولوجية، وهو الذي يحدد هوية الأشخاص اعتماداً على صفاتهم وخصائصهم الفريدة. سابقاً تم الاعتماد على الملاحظة الظاهرية وتطور حتى وصل إلى تحليل الحمض النووي. مع ازدياد الجرائم ازدادت الحاجة إلى وسيلة ثابتة لتمييز الأشخاص، ومن هنا ظهرت بصمات الأصابع حيث أثبتت الدراسات أن بصمة الأصبع ميزة فريدة لكل إنسان، لا تتشابه ولا تتطابق حتى عند التوائم المتماثلة، ولا تتغير حتى مع مرور الزمن، حيث أصبحت بصمات الأصابع وسيلة أساسية في تحديد هوية الضحايا والجناة، وربطهم بمسرح الجريمة، وأيضاً وسيلة للتعرف على الجثث.

في منتصف القرن العشرين، وبعد اكتشاف الحمض النووي وفهم تركيبه، أعلن العالم أليك جيفريز اكتشافه لتقنية البصمة الوراثية في عام 1985م. وهي نمط فريد من تسلسلات الحمض النووي القصيرة، حيث تختلف من شخص لآخر، ولكن تتشابه في التوائم المتطابقة جينياً، ويتم استخلاصها من (اللعاب، الشعر، الدم، والسوائل البيولوجية). هذا التطور للتقنية جعل الطب الشرعي أكثر دقة وساعد في تحقيق العدالة. ولكن هذا التطور ليس نهاية تقدم التقنية، بل هناك اتجاه علمي حديث يعرف بالبصمة المناعية، وهي امتداد للطب الشرعي مع تقدم التقنية في علم المناعة. وهي نمط فريد يعتمد على الاستجابة المناعية للإنسان، حيث يتأثر بعوامل بيئية، ووراثية، ومرضية.

تعتبر البصمة الوراثية التقليدية وسيلة مهمة في الطب الشرعي، لدقتها في تحديد الهوية الفردية. ومع هذا، استخدامها لا يخلو من حدود قانونية وعلمية، قد تؤثر على نتائجها. فكما تطرقنا مسبقاً، فالبصمة الوراثية تتشابه بين التوائم المتماثلة جينياً، وهي تعتمد على تسلسل تكرارات الحمض النووي مما لا تستطيع التمييز بين التوائم المتطابقة، لاشتراكهم في نفس التركيب الجيني النووي. هذا التشابه يجعل البصمة الوراثية عاجزة عن تحديد أي توأم كان متواجداً في مسرح الجريمة.

تقنياً، قد تتأثر نتائج البصمة الوراثية بمدى جودة العينة، العينات الملوثة والتالفة أو قليلة الكمية ستؤدي إلى ظهور نتائج خاطئة. وتزداد المشكلة في حال اختلاط العينات لأكثر من فرد، مما يجعل النتائج مضللة. أما وظيفتها فهي تقتصر على إثبات أو نفي التطابق الجيني، دون زيادة أي معلومة عن صفات الجاني الشكلية أو عمره أو ظروفه الحياتية. وبناءً على هذا، رغم أهمية البصمة الوراثية التقليدية فهي ليست وسيلة مطلقة، بل يجب التعامل معها بحذر. مما دفع إلى تطوير تقنيات جديدة علمية أكثر دقة وموثوقية، تهدف إلى تعزيز مصداقية الأدلة العلمية في تحقيق العدالة الجنائية.

التطور السريع في التقنيات الحديثة أدى إلى ظهور مفهوم جديد يعرف بالبصمة المناعية، والتي ظهرت كاستجابة لحدود البصمة الوراثية وحاجتها إلى أداة ووسيلة مكملة لها. والمقصود بالبصمة المناعية هي مجموعة من الخصائص المناعية الفردية التي تميز كل فرد عن غيره، من خلال الاستجابة المناعية وتفاعلات الجهاز المناعي الحيوية. فالمناعة جهاز مناعي مكون من شبكة من الخلايا والأعضاء والأنسجة التي تعمل على الدفاع عن الجسم وحمايته من الجراثيم التي قد تهاجمه مثل: الفيروسات والبكتيريا، والتي قد تسبب له العدوى والأمراض. تتمثل ميزة الجهاز المناعي بقدرته على التعرف على الأجسام الغريبة التي تهاجم جسم الإنسان، والتخلص من الخلايا التالفة والضارة، وتكوين ذاكرة مناعية تحتفظ بسجل للميكروبات التي واجهها مسبقاً مما يمنح الجسم حماية طويلة. هذا التنوع المناعي يسمى بالتوقيع المناعي للفرد، وهو فريد بدرجة تشبه أو تفوق البصمة الوراثية. يُستخرج هذا التوقيع باستخدام تقنيات التسلسل الجيني، وتحليل البيانات الحيوية، مما يسمح بتحديد هوية الأشخاص أو تتبع تعرضهم المسبق لمسببات أمراض معينة.

القيمة الجنائية للبصمة المناعية تتمثل في كونها وسيلة مساعدة مهمة في التحقيقات الجنائية. لا سيما في الحالات التي تفشل فيها الأدلة التقليدية. فالبصمة المناعية تمتد لتشمل خصائص الجهاز المناعي الوظيفية واستجابته. فهي تعوض القصور في البصمة الوراثية، مثلاً في بعض القضايا تكون المادة الوراثية تالفة أو متحطمة ولا تكفي للتحليل، هنا تكون بعض العلامات المناعية كالأجسام المضادة أو المستضدات أو البروتينات قابلة للكشف، مما يمكن الاستفادة منها كدليل بيولوجي داعم.

يمكن التمييز بين سوائل الجسم الأخرى من خلال التحليل المناعي، وهذا مهم لربط المشتبه به بمسرح الجريمة. كما يمكن أن تساعد في التقليص من عدد المشتبه بهم، حتى لو لم تحدد هوية الشخص القاطعة، مما يختصر الوقت والجهد في العمل الجنائي.

وتكمن قيمتها الجنائية أيضاً في تكوين ذاكرة مناعية تحتفظ بسجل للميكروبات التي واجهها مسبقاً مما يمنح الجسم حماية طويلة. هذه الذاكرة ترتبط بتعرض الشخص لأمراض محددة أو عوامل بيئية أو لقاحات، فهي توفر علامات عن نمط حياة الشخص ووضعه الصحي، وقد تكون ذات دلالات في بعض القضايا. بالإضافة إلى كونها أداة فعالة في تعزيز قوة الدليل الجنائي. قد تفشل تقنيات البصمة الوراثية عند العثور على عينات بيولوجية (عرق، دم، سوائل) في حال تعرضها لعوامل بيئية قاسية مما أدى إلى تدهور الحمض النووي وتلفه. وفي هذا الوضع تكون العينة غير صالحة للتحليل. هنا تُظهر الاستجابات المناعية مثل (البروتينات المناعية وأنماط الأجسام المضادة) علامات عن مصدر العينة (الشخص).

في حالات أخرى، قد يصعب الفصل الجيني بين العينات عند وجود العديد من الآثار البيولوجية المختلطة والتي تعود لأكثر من شخص. نظرياً، اختلاف الأنماط المناعية بين الأشخاص يسمح بتقديم أدلة وبراهين للتمييز بينهم.

عند حدوث حالة وفاة غامضة، يتم تحليل الاستجابة المناعية والتي قد تعطي علامات تدل على وجود عدوى أو تسمم أو أي سبب آخر مما يساعد في كشف سبب الوفاة.

البصمة المناعية ليست بديل عن الأدلة المادية أو البصمات الوراثية، بل تُستخدم كأداة تدعم الأدلة الأساسية في حال تلفها أو نقصها. فهي تُسهم في بناء صورة أشمل لحالة الفرد الصحية، وهذا ما يدعم فرضيات التحقيق الجنائي. واستخدامها العملي لا يزال في إطار الدراسة والبحث العلمي.

استخدام البصمة الوراثية والبصمة المناعية له حدود أخلاقية وقانونية، لارتباطهما بشكل مباشر بالهوية البيولوجية للشخص وما تتضمنه من بيانات حساسة. ومن هذه الحدود والإشكاليات هي حماية الخصوصية. كما ينبغي جمع العينات البيولوجية وفق إجراءات قانونية تحترم حقوق الفرد وكرامته. أيضاً يجب ضمان سرية قواعد البيانات ومنع إساءة الاستخدام. يمثل هذا الموضوع خطوة مستقبلية طموحة لدمج علم المناعة التحليلي في منظومة الطب الشرعي، ويوفر رؤية جديدة لمفهوم الهوية البيولوجية.

برأيي تُعد البصمة المناعية وسيلة مهمة في التحقيقات الجنائية لأنها تساعد في كشف وتحليل الأدلة البيولوجية مثل الدم والسوائل الأخرى، بالأخص في الحالات التي تكون فيها العينات قليلة أو تكون متدهورة. ورغم أنها لا تعطي نتائج دقيقة مثل البصمة الوراثية، إلا أنها تلعب دوراً مهماً في دعم التحقيقات.

مستقبلاً، أعتقد أن البصمة المناعية ستتطور بفضل التقدم في التقنيات وزيادة الدقة في اختبارات المناعة، كما أن دمج البصمة المناعية مع التقنيات الحديثة مثل تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي سيعزز من دقة النتائج ويقلل من نسبة الخطأ فيها. لذلك أنا أؤيد استخدام البصمة المناعية كوسيلة داعمة ومساعدة إلى جانب الأدلة الجنائية الأخرى.

في حين أن تطبيق تقنيات البصمة الجينية متقدم للغاية وأظهر دقة عالية في تحديد الهوية، فإن عيوبها في حالات معينة، مثل تلف العينة أو تشابه التوائم المتطابقة، تظهر فجوة علمية كبيرة تتطلب البحث عن اختبارات بيولوجية مكملة وأكثر تنوعا. علاوة على ذلك، على الرغم من أن فكرة البصمة المناعية ظهرت مؤخرًا في الأدبيات العلمية، إلا أنها لا تزال تفتقر إلى إطار منهجي ورسمي لتطبيقها وحدودها وأهميتها الجنائية في القضايا الجنائية. لذلك، الهدف الرئيسي هو تحليل مفهوم البصمة المناعية، وتحديد أساسها العلمي، وتقييم إمكانية استخدامها كأداة داعمة في البصمة الجينية والطب الشرعي.

على الرغم من أن تحليل الحمض النووي يُعد حجر الأساس في تحديد الهوية الجنائية، إلا أنه يقدم صورة ثابتة نسبيًا عن الفرد، ولا يعكس التغيرات الديناميكية الناتجة عن التفاعل المستمر مع البيئة والعوامل المرضية (كايزر ودي كنايف، 2011). هذا القصور دفع الباحثين إلى البحث عن مؤشرات بيولوجية أكثر حساسية للسياق الزمني، مما أدى إلى الاهتمام بالبصمة المناعية كأداة واعدة في هذا المجال.

تعتمد البصمة المناعية على تحليل تنوع مستقبلات الخلايا المناعية، مثل مستقبلات الخلايا التائية والبائية، والتي تتولد عبر عمليات إعادة ترتيب جيني معقدة تتيح التعرف على نطاق واسع من المستضدات (غريف وآخرون، 2015). هذا التنوع لا يُعد عشوائيًا بالكامل، بل يتأثر بتاريخ التعرض المناعي للفرد، بما في ذلك العدوى السابقة والتطعيمات، مما يمنح هذه البصمة بعدًا زمنيًا مهمًا (روبينز، 2013).

وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن تحليل هذه المستقبلات يمكن أن يكشف عن أنماط مرتبطة بالتعرض لعوامل ممرضة معينة، حيث تمكن الباحثون من التنبؤ بحالة التعرض لبعض الفيروسات بناءً على أنماط مستقبلات الخلايا التائية (إيمرسون وآخرون، 2017). وهذا يفتح المجال أمام استخدام البصمة المناعية ليس فقط لتحديد الهوية، بل لفهم التاريخ البيولوجي للفرد.

مع ذلك، فإن إدخال هذا النوع من الأدلة في المجال الجنائي لا يخلو من التحديات، خاصة فيما يتعلق بتعقيد البيانات وصعوبة تفسيرها، بالإضافة إلى الحاجة إلى تطوير أطر قانونية ومنهجية تدعم استخدامها كدليل موثوق (فيدريتش وآخرون، 2020). كما أن الطبيعة الديناميكية للجهاز المناعي تثير تساؤلات حول استقرار هذه البصمة مع مرور الزمن.

بناءً على ذلك، يهدف هذا البحث إلى استكشاف إمكانيات البصمة المناعية كأداة ناشئة في علم الأدلة الجنائية، من خلال تحليل الأسس الجزيئية والتقنيات المستخدمة، إلى جانب مناقشة التطبيقات والتحديات المرتبطة بها، مع التركيز على الفجوة بين البحث الأكاديمي والتطبيق العملي.

لم يعد مفهوم الهوية البيولوجية في السياق الجنائي مقتصرًا على البصمة الوراثية التقليدية، بل أصبح يُنظر إليه ككيان ديناميكي متعدد الأبعاد يتأثر بالتفاعل المستمر بين العوامل الجينية والبيئية. ففي حين يوفر الحمض النووي معلومات ثابتة نسبياً عن هوية الفرد، فإن الجهاز المناعي يعكس تاريخاً حيوياً متغيراً يتضمن التعرضات البيئية، والحالات المرضية، والاستجابات المناعية المختلفة. ومن هذا المنطلق، برزت فكرة "البصمة المناعية" كأداة محتملة لتقديم بعد إضافي في التعرف الجنائي، خاصة في الحالات التي تكون فيها الأدلة التقليدية محدودة أو غير حاسمة (روبينز 2013).

كما أن التطورات الحديثة في تقنيات التسلسل عالي الإنتاجية وتحليل البيانات الحيوية قد مكّنت الباحثين من دراسة التنوع الهائل في مستقبلات الخلايا المناعية، مثل مستقبلات الخلايا التائية (TCR) والخلايا البائية(BCR) ، مما أتاح إمكانية استخدام هذه البيانات في التمييز بين الأفراد أو تتبع حالات التعرض المناعي. ومع ذلك، لا تزال هذه المقاربة في مراحلها البحثية، وتتطلب فهماً أعمق للتباين الطبيعي في الجهاز المناعي بين الأفراد، بالإضافة إلى تطوير نماذج تحليلية قادرة على التعامل مع هذا التعقيد (ميهو وآخرون، 2018).

على خلاف الأدلة البيولوجية التقليدية، لا تقتصر البصمة المناعية على كونها أداة تعريفية، بل تمتد لتكون انعكاسًا ديناميكيًا للتفاعل المستمر بين الفرد وبيئته. إذ يتشكل المستودع المناعي نتيجة التعرضات المتكررة لمجموعة واسعة من العوامل، مثل مسببات الأمراض، والتطعيمات، والعوامل البيئية، وحتى نمط الحياة. ومن هذا المنطلق، يمكن النظر إلى البصمة المناعية "كسجل بيولوجي" يحمل في طياته معلومات عن التاريخ المناعي للفرد، وليس فقط هويته (إيمرسون وآخرون، 2017).

وقد أظهرت الدراسات أن الأفراد الذين يتعرضون لبيئات متشابهة، مثل أفراد الأسرة أو العاملين في نفس المجال، قد يظهرون أنماطًا متقاربة في بعض مكونات المستودع المناعي، نتيجة التعرض لمثيرات مناعية مشتركة. وعلى الرغم من أن هذه التشابهات لا تصل إلى حد التطابق، إلا أنها تفتح المجال أمام استخدام البصمة المناعية في استنتاج بعض السمات البيئية أو السلوكية المرتبطة بالفرد.

وفي السياق الجنائي، يمكن أن تسهم هذه الخصائص في توفير معلومات إضافية حول ظروف العينة أو نمط حياة صاحبها، مثل التعرض المهني لمسببات معينة أو التاريخ المرضي التقريبي. ومع ذلك، فإن هذا الاستخدام يتطلب حذرًا شديدًا، نظرًا لاحتمالية التداخل بين العوامل المختلفة وصعوبة فصل تأثير كل منها بشكل مستقل.

كما أن تفسير هذه الأنماط يتطلب نماذج تحليلية متقدمة قادرة على ربط البيانات المناعية بالسياقات البيئية بشكل دقيق، دون الوقوع في استنتاجات مبالغ فيها أو غير مدعومة بالأدلة. وبالتالي، فإن استخدام البصمة المناعية كمؤشر بيئي لا يزال في مراحله البحثية، إلا أنه يمثل بعدًا واعدًا يضيف قيمة نوعية إلى هذا المجال.

الأهداف البحثية:

تهدف هذه الدراسة إلى ما يلي:

1. توضيح مفهوم البصمة المناعية وشرح مكوناتها الأساسية بطريقة مبسطة، مع بيان الفرق بينها وبين البصمة الوراثية التقليدية، بما يساعد القارئ غير المتخصص على فهم الفكرة العامة للتوقيع المناعي.

2. استعراض التطور العلمي في تقنيات تحليل التنوع المناعي، مع التركيز على كيفية استخدام هذه التقنيات في التمييز بين الأفراد من منظور علمي عام ودون الدخول في تفاصيل تقنية معقدة.

3. تحليل إمكانية توظيف البصمة المناعية في التحقيقات الجنائية مستقبلاً، من خلال مناقشة دورها المحتمل في تحديد الهوية أو دعم الأدلة البيولوجية في بعض القضايا الجنائية.

4. المقارنة بين البصمة الوراثية والبصمة المناعية من حيث الثبات والخصوصية والقابلية للتغير ومدى الاعتماد الجنائي لكل منهما.

5. مناقشة التحديات الأخلاقية والقانونية المرتبطة باستخدام البيانات المناعية في المجال الجنائي خاصة ما يتعلق بخصوصية الأفراد وحماية البيانات الحيوية.

6. اقتراح تصور جنائي مستقبلي مبسط لكيفية إدماج مفهوم "الهوية المناعية" كأداة داعمة ضمن منظومة الأدلة الجنائية، دون اعتبارها بديلا عن الأدلة المعتمدة حاليا.

الدراسات السابقة:

على الرغم من أن استخدام البصمة المناعية في المجال الجنائي لا يزال في مراحله الأولى، إلا أن هذا المفهوم قد أثبت فعاليته في مجالات أخرى، خاصة في الطب والبحث العلمي. فقد استُخدمت تقنيات تحليل المستودع المناعي في دراسة الاستجابات المناعية للأمراض، وتطوير اللقاحات، وحتى في التنبؤ بنتائج العلاج في بعض الحالات .فعلى سبيل المثال، تم استخدام تحليل مستقبلات الخلايا التائية لتتبع الاستجابة المناعية للعدوى الفيروسية، مثل الفيروس المضخم للخلايا، حيث أظهرت الدراسات أن بعض الأنماط المناعية يمكن أن ترتبط بشكل مباشر بالتعرض للفيروس، إيمرسون وآخرون (2017).

كما استُخدمت هذه التقنيات في مجال السرطان، حيث يمكن تحليل المستودع المناعي داخل الورم لفهم كيفية تفاعل الجهاز المناعي مع الخلايا السرطانية، مما يساعد في تطوير علاجات مناعية أكثر فعالية.

إضافة إلى ذلك، فإن تحليل البصمة المناعية قد يسهم في تشخيص بعض الأمراض المناعية، من خلال الكشف عن أنماط غير طبيعية في المستقبلات المناعية .وبالتالي، فإن النجاحات التي حققتها هذه التقنيات في المجال الطبي تعزز من إمكانية نقلها إلى المجال الجنائي، مع الأخذ في الاعتبار الاختلافات في طبيعة الاستخدام ومتطلبات الدقة.

لقد أثارت التطورات الأخيرة في الاختبارات الجزيئية والمناعية اهتماما كبيرا في تحديد بصمة مناعية بالتوازي مع البصمة الجينية كطريقة مكملة للأدلة الجنائية، وتستمر الدراسات الجديدة حول استخدام البصمة المناعية. في هذا الصدد، طبقت بعض التحقيقات تقنية علامات البروتين في تحديد السوائل البيولوجية. أظهر دينينجر (2016) وهاربيسون وفليمينغ (2016) أن إحدى الطرق لتحديد مصدر السوائل البيولوجية (الدم، اللعاب والعرق) بناءً على بصمات البروتين هي استخدام بصمات البروتين. اعتمد هاربيسون وفليمينغ على الأجسام المضادة التي تستهدف بروتينات محددة لكل سائل بيولوجي، مثل الهيموغلوبين في الدم، مع تحقيق هذه الطريقة في التحليل حساسية عالية ويمكن استخدامها في عدد قليل من العينات مع الحفاظ على سلامة الحمض النووي، ولهذا السبب قد تمتد أيضا مع التحليل الجيني. استخدم دينينجر طرق قياس الطيف الكتلي لدراسة الببتيدات الدموية والنمط المكاني عبر العينات، مما زاد من القدرة على الربط مع الأفراد في مسرح الجريمة. تجد الدراستان أن تحليل البروتين يمثل خطوة مهمة نحو توسيع نطاق الأدلة الجنائية البيولوجية.

شهدت السنوات الأخيرة توسعًا كبيرًا في الدراسات التي تناولت تحليل مستقبلات الخلايا المناعية باستخدام تقنيات التسلسل عالي الإنتاجية، حيث انتقل التركيز من الوصف إلى التحليل والتطبيق، ميهو وآخرون (2018). ويمكن تصنيف هذه الدراسات إلى محورين رئيسيين: دراسات مناعية أساسية، وأخرى ذات توجه تطبيقي. في الجانب المناعي، ركزت العديد من الدراسات على توصيف تنوع مستقبلات الخلايا التائية والبائية، حيث أظهرت أن هناك أنماطًا مشتركة بين الأفراد عند التعرض لنفس المستضدات، تُعرف بـ "المستنسخات العامة" (غريف وآخرون، 2015). هذه النتائج تشير إلى إمكانية وجود بصمات مناعية يمكن تتبعها وتحليلها عبر الأفراد.

كما ساهمت التطورات في مجال المعلوماتية الحيوية في تعزيز تحليل هذه البيانات، حيث تم تطوير أدوات قادرة على التعامل مع البيانات عالية الأبعاد واستخلاص أنماط ذات دلالة بيولوجية (ميهو وآخرون، 2018). وقد تم استخدام تقنيات تعلم الآلة لتحسين دقة التصنيف والتنبؤ بالحالات المرضية أو التعرضات المناعية (فيدرتش وآخرون، 2020).

أما في السياق الجنائي، فقد بدأت بعض الدراسات في استكشاف إمكانية استخدام هذه البيانات كأداة مساعدة في تحديد الهوية أو ربط الأفراد ببيئات معينة. على سبيل المثال، أظهرت إحدى الدراسات إمكانية التنبؤ بالتعرض للفيروس المضخم للخلايا من خلال تحليل مستقبلات الخلايا التائية بدقة ملحوظة (إيمرسون وآخرون، 2017).

وعلى الرغم من هذه النتائج، إلا أن هناك عددًا من القيود التي تحد من التطبيق العملي لهذه الدراسات، من أبرزها اختلاف طرق التحليل وغياب بروتوكولات معيارية موحدة، بالإضافة إلى محدودية الدراسات الطولية التي تقيم استقرار البصمة المناعية عبر الزمن (روبينز 2013).

بناءً على ذلك، تبرز فجوة واضحة بين التقدم البحثي والتطبيق الجنائي، مما يستدعي المزيد من الدراسات التي تركز على توحيد المنهجيات وتعزيز القبول القضائي لهذه الأدلة.

في محاولة لدراسة خصوصية المناعة الفردية الفريدة، تم إجراء دراسات أخرى للنظر في تنوع مستقبلات الخلايا المناعية كإمكانية لبصمة بيولوجية فردية للتعرف على مستقبلات الخلايا المناعية المختلفة. أظهر إيمرسون وآخرون (2017) أن التعرض السابق لسلالات فيروسية معينة مثل الفيروس المضخم للخلايا يرتبط بنمط غير عادي من توقيعات مستقبلات الخلايا الليمفاوية وأن الجهاز المناعي يمكنه تتبع التعرّضات المرضية السابقة التي قد توفر رؤى حول كيفية احتفاظ الجهاز المناعي بالمعلومات لاستخدامها في الكشف وربما حتى لأغراض جنائية. من منظور تحليلي بديل، استخدم سيفي وآخرون (2019) تحليل المكونات الرئيسية لتوصيف مسارات المناعة بين الأفراد وأفادوا بأن الأنماط المناعية قد تكون متشابهة بين مجموعات من الناس استجابة للتعرضات البيئية والفيروسية. تؤكد هذه النتائج على أن الجهاز المناعي ليس عملية عشوائية، بل هو نظام ذاكرة بيولوجي - ويمكن أن يعكس كل من مسار المرض وتاريخ البيئة. علاوة على ذلك، ساعدت الأبحاث الجديدة أيضا في دعم مفهوم التفرد المناعي والقياس الكمي له. وجد دوبيك وآخرون (2020) مستوى عالٍ من التشابه من العينات المأخوذة من نفس الشخص إلى العينات من مواضيع أخرى، ونمط مناعي فردي يمكن تطبيقه في نموذج تمايز بيولوجي. في الواقع، في دراسة أخرى (دوبيك وآخرون، 2023)، يمكن تمييز التوائم المتطابقة جينيًا من خلال مجموعة المناعة الخاصة بهم، بناءً على تاريخ تعرضهم البيئي والمرضي، بسبب اختلافهم في تاريخ المرض. هذه النتائج هي علامة مهمة على فائدة البصمة المناعية عندما قد لا تكون البصمة الجينية قادرة على التمييز بين الفرد والجسم في الإعدادات السريرية.

على المستوى التقني، ساعد التطور المعاصر لطرق التسلسل الجيني الجديدة في تحقيق أبحاث مجموعة المناعة. ناقش ليو وآخرون (2025) طرق التسلسل الجيني الطويلة. في الوقت نفسه، باستخدام تسلسلات أطول من هذه التكنولوجيا الجديدة للتسلسل، يتم الحصول على رؤية أكثر اكتمالاً ودقة لتنوع مستقبلات المناعة وأخطاء أقل في تضخيم الحمض النووي. تشير هذه التطورات إلى إمكانية تحسين التكنولوجيا لكل من موثوقية البصمة المناعية والعمل الجنائي المستقبلي الذي يمكن تفسيره من خلاله. على الرغم من أن هذه الإمكانيات قد تكون واعدة، فقد حددت بعض الأبحاث صعوبات علمية وقانونية في استخدام تتبع المناعة. أفاد محنّا وآخرون (2024) أن البصمة المناعية تتأثر بعدة عوامل تعتمد على الزمن مثل العدوى واللقاحات والشيخوخة مما يجعلها ليست أكثر استقرارا من البصمة الجينية. لاحظ كين وآخرون (2024) في مقالهم السابق أن تعقيد الجهاز المناعي جعل من الصعب تفسير بياناتهم بسبب التغيير في المستقبلات، مما يتطلب استخدام نماذج تحليلية معقدة. قدم تيواري (2024) أيضا معرفة بالقضايا القانونية والأخلاقية المحيطة ببيانات المناعة بسبب مخاوف الخصوصية التي قد تكون لها تداعيات على هذه البيانات، مما يبرز المعلومات الصحية الحساسة أو تاريخ المرض للفرد، وكلها تتطلب ضمانات تنظيمية لتطبيق آليات حماية الخصوصية الخاصة بهم في الإعداد

الجنائي. على العكس من ذلك، لا يزال التعرف الجيني هو الطريقة الأكثر موثوقية للتحقق الجنائي. أظهرت رباب مصطفى عبد المنعم أن التعرف الجيني هو أحد أكثر التقنيات فعالية للإثبات في العصر الحديث، والتي يمكن أن تثبت وتدحض التهم مما يثبت الوضع القانوني العالي.

من هذه النتائج نقترح أن الدراسات الحديثة قد تقترح أبحاث البصمة المناعية لدعم الأدلة الجنائية. ومع ذلك، لا تزال الأبحاث تواجه مشكلات تتعلق بالاستقرار الزمني، ومعالجة البيانات المعقدة والمخاوف الأخلاقية ذات الصلة، لذلك هناك حاجة إلى تحقيقات إضافية لتحديد موثوقية وفائدة هذه الطريقة في القضايا الجنائية.

شهدت السنوات الأخيرة تزايداً ملحوظاً في الدراسات التي تسعى إلى استكشاف الإمكانات التطبيقية لتحليل مستقبلات الخلايا المناعية في مجالات غير تقليدية، ومن أبرزها المجال الجنائي. فقد ركزت بعض الدراسات على استخدام تقنيات التسلسل المناعي للكشف عن أنماط مميزة مرتبطة بالتعرضات الفيروسية، كما في دراسة إيمرسون وآخرين (2017)، التي أظهرت إمكانية التنبؤ بتاريخ التعرض للفيروس المضخم للخلايا من خلال تحليل مستقبلات الخلايا التائية.

من جهة أخرى، اتجهت دراسات حديثة إلى توظيف تقنيات تعلم الآلة لتحليل التعقيد العالي في بيانات الجهاز المناعي، حيث تم تطوير نماذج قادرة على تصنيف الحالات المرضية بناءً على أنماط مستقبلات الخلايا التائية، كما في دراسة زانج وآخرين (2025)، التي استخدمت تقنيات التعلم متعدد الحالات لتصنيف أمراض المناعة الذاتية. وتشير هذه النتائج إلى أن البصمة المناعية لا تعكس فقط هوية بيولوجية، بل قد تحمل معلومات تشخيصية وتاريخية دقيقة.

وعلى الرغم من هذه التقدمات، لا تزال هناك تحديات كبيرة تتعلق بإمكانية تطبيق هذه التقنيات في السياق الجنائي، بما في ذلك التباين العالي بين الأفراد، وتأثير العوامل البيئية، وغياب قواعد بيانات معيارية واسعة النطاق. كما أن معظم الدراسات الحالية تركز على التطبيقات الطبية، في حين أن الترجمة إلى المجال الجنائي لا تزال محدودة وتتطلب المزيد من البحث المنهجي (غريف وآخرون، 2015).

منهجية الدراسة:

الإطار المفاهيمي والتحليلي للبصمة المناعية كأداة مستقبلية في التحقيقات الجنائية.

. مدخل نظري: تحوّل مفهوم الهوية في العلوم الجنائية:

تحول مفهوم الهوية في علوم الأدلة الجنائية منذ أواخر القرن العشرين، حيث شهد علم الأدلة الجنائية تحولاً ثورياً عندما ظهرت بصمة الحمض النووي - حيث أصبح الحمض النووي المعيار الفعلي لتحديد الهوية. عمل هذا النموذج على استقرار التسلسلات الجينية والدقة الإحصائية لاحتمالات المطابقة. ومع ذلك، تظل الهوية البيولوجية، وفقًا لهذا النموذج، محدودة بالهيكل الجيني الموروث، وهو هيكل ثابت لا يتوافق مع اللقاءات البيئية أو التاريخ المناعي للشخص. ومع التقدم الكبير في علم المناعة الجزيئي وتسلسل الجيل التالي، تطور مفهوم جديد يوسع هذه الأسس ويُشار إليه بالبصمة المناعية. هذا المفهوم مستمد من فكرة أن النظام المناعي التكيفي ليس فقط نظام دفاعي تكيفي، بل هو أيضًا أرشيف جزيئي ديناميكي يتتبع التعرض المناعي للفرد بمرور الوقت. ومن هنا السؤال الجنائي: هل يمكن لمثل هذا الأرشيف المناعي أن يعمل كأداة تحديد هوية بيولوجية مكملة أو موازية لبصمة الحمض النووي.

1.2 الأساس الجزيئي لتمييز المناعة:

إعادة ترتيب الجينات كمصدر للتنوع يتم تحقيق التنوع المناعي من خلال آلية تسمى إعادة التركيب، والتي تتضمن إعادة تركيب عدة مواقع لتوليد مستقبلات الخلايا التائية والبائية. هذه الميزة لا تكتب في الجينات التي تولد بها، تصنع داخل الجسم عبر عمليات جزيئية معقدة. ومع ذلك، لا ينتج التنوع فقط عن إعادة الترتيب؛ بل يتحسن أيضًا من خلال:

- التنوع الوصلي.
- إدخال نيوكليوتيدات عشوائية.
- الانتقاء المناعي.
- التوسع النسيلي بعد التعرض للمستضد.

لا يقتصر تنوع المستقبلات المناعية على إعادة ترتيب المقاطع الجينية، بل يمتد ليشمل ما يُعرف بالتنوع الوصلي، حيث يتم إدخال أو حذف قواعد نوكليوتيدية أثناء عملية إعادة التركيب، مما يزيد من تعقيد وتنوع المستقبلات (غريف وآخرون 2015).

بالإضافة إلى إعادة ترتيب المقاطع الجينية، يلعب ما يُعرف بالتنوع الوصلي دورًا حاسمًا في زيادة التعقيد في مستقبلات الخلايا المناعية، حيث يتم إدخال أو حذف نيوكليوتيدات بشكل عشوائي عند نقاط الاتصال بين هذه المقاطع، مما يؤدي إلى توليد عدد هائل من التراكيب الفريدة. ويُعد هذا النوع من التنوع أحد الأسباب الرئيسية التي تجعل من الجهاز المناعي نظاماً عالي التخصص وقادراً على التعرف على مجموعة واسعة من المستضدات (دوبيك وآخرون 2021).

علاوة على ذلك، تخضع الخلايا المناعية لعمليات اختيار دقيقة، مثل الانتقاء الإيجابي والسلبي، والتي تضمن بقاء الخلايا القادرة على التعرف على المستضدات دون مهاجمة الذات. وتؤدي هذه العمليات إلى تشكيل ما يُعرف بالمستودع المناعي، والذي يُمثل بصمة فريدة لكل فرد، تتأثر بعوامل

متعددة مثل العمر، والتعرضات البيئية، والحالة الصحية. وبالتالي، فإن فهم هذه العمليات يُعد أساسياً لتقييم إمكانية استخدام البصمة المناعية في التطبيقات الجنائية.

إضافة إلى ذلك، تلعب عملية الانتقاء النسيلي دورًا محوريًا في تشكيل البصمة المناعية، حيث يتم تضخيم الخلايا التي تستجيب لمستضد معين، مما يعكس التاريخ المناعي الفعلي للفرد (روبينز 2013). هذا يجعل البصمة المناعية أكثر من مجرد تنوع جيني، بل سجلًا ديناميكيًا للتعرضات المناعية.

2.2 الانتقاء الاحتمالي وتشكيل البنية لتركيبة المناعة:

جينات الأجسام المضادة ومستقبلات الخلايا التائية تخضع لعملية هندسية عشوائية على عكس معظم جينات الجسم التي ترثها كقوالب ثابتة، مما يجعل من المستحيل التنبؤ ببنيتها النهائية. تحتوي الجينات المناعية على العديد من المجموعات والقطع، حيث يتم اختيار قطعة واحدة من كل مجموعة بشكل عشوائي في كل خلية مناعية، هنا أصبح لدينا العديد من القطع لكل مجموعة، لذا فإن عدد التوافيق المحتملة كبير جدا. وهذا ما أشارت إليه دراسة محنا وآخرون (2024) بأنه "تحليل سجلات المستقبلات التكيفية"، حيث تم رصدها كبصمة رقمية.

3.التوقيع المناعي كهوية عالية الأبعاد:

يُعرف التوقيع المناعي بأنه هوية عالية الأبعاد لأنه لا يعتمد على متغير واحد مثل طول شريط الحمض النووي، بل يعتمد على آلاف المتغيرات التي تشمل تسلسل النيوكليوتيدات، وفرة الخلايا، وتاريخ التعرض للأمراض. هذا التعقيد يجعل تكرار نفس الملف المناعي بين شخصين مستحيلا.

3.1 الأنماط المستنسخة العامة مقابل الخاصة:

لفهم الهوية المناعية جنائياً، يجب التمييز بين نوعين من الأنماط المناعية التي تظهر عند تحليل "المخزون المناعي". وهذا ما ركزت عليه دراسة دوبيك وآخرون (2020). وعند وجود نمط مستنسخ خاص في عينة من مسرح الجريمة يتطابق مع عينة المشتبه به تطابقاً جينياً يتجاوز دقة البصمة الوراثية التقليدية، بالأخص عند التمييز بين التوائم المتطابقة، دوبيك وآخرون (2021).

3.2 إظهار القدرة التنبؤية الحاسوبية في دراسة بارزة:

استخدم إيمرسون وآخرون (2017) التسلسل المناعي واسع النطاق للكشف عن توقيعات الخلايا التائية المرتبطة بالتعرض للفيروس المضخم للخلايا باستخدام تقنيات التعلم الآلي، قاموا ببناء نموذج تنبؤي عالي الدقة. تمثل هذه الدراسة دليلاً قوياً على أن:

• التشكيلة المناعية تحمل معلومات تاريخية.

• يمكن استخراج هذه المعلومات بشكل خوارزمي.

• يمكن تمثيل الهوية المناعية إحصائيًا.

4.البعد الزمني: هل الاستقرار شرط مطلق؟

البصمة يجب أن تكون ثابتة في العرف الجنائي التقليدي ولا تتغير مثل (بصمات الأصابع أو الحمض النووي)، لكن "البصمة المناعية" الاستقرار ليس شرطاً فيها، فعدم الاستقرار هو نقطة القوة التنبؤية في الدليل الجنائي. وبدلاً من اعتبار أن التغير الزمني عائقاً، يحلل البحث كيفية استغلاله لتحديد وقت الجريمة ولتحديد عمر العينة، وهذا ما أوضحته دراسة كين وآخرون (2024) حول تحليل البروتينات، حيث يمكن قياس مدى تلف وتدهور أو تغير البروتينات المناعية في مسرح الجريمة لتقدير المدة التي قضاها الدليل الحيوي في المكان. فالبصمة المناعية تمنح صورة فوتوغرافية لوضع المتهم وقت الجريمة، مثلاً كان المتهم مصاباً بالانفلونزا عند وقوع الحادث، فبصمته المناعية في مسرح الجريمة ستعكس ذلك، حتى لو تماثل للشفاء عند إلقاء القبض عليه.

5. التطور التقني وتحليل البيانات:

أحدثت تقنيات التسلسل عالي الإنتاجية تحولًا كبيرًا في دراسة البصمة المناعية، حيث أصبح من الممكن تحليل ملايين التسلسلات في تجربة واحدة (روبينز 2013). تبدأ العملية باستخلاص المادة الوراثية، ثم تضخيمها، يلي ذلك عملية التسلسل التي تنتج بيانات ضخمة.

غير أن التحدي الأكبر يكمن في تحليل هذه البيانات، حيث تُستخدم أدوات المعلوماتية الحيوية لمعالجة القراءات وتنظيمها واستخلاص الأنماط منها (ميهو وآخرون 2018). كما تم توظيف خوارزميات تعلم الآلة لتحسين القدرة على اكتشاف العلاقات المعقدة داخل البيانات (فيدريتش وآخرون 2020).

مع ظهور تقنيات التسلسل حدثت نقلة وقفزة نوعية ناقشها ليو وآخرون (2025) في دراستهم، حيث تم الانتقال من قراءة أجزاء صغيرة من الحمض النووي إلى القدرة على قراءة تسلسل مستقبلات الخلايا المناعية بالكامل وبدقة، مما يسمح بالكشف عن التنوع الوصلي الذي يمثل "قلب" البصمة الفردية. لم يتوقف التطور عند الحمض النووي، بل شمل البروتينات، وهذا ما أشارت إليه دراسة كين واخرون (2024)، أشاروا إلى أن استخدام مطياف الكتلة عالي الدقة غير قواعد اللعبة في الطب الشرعي. ركزت دراسة دينينجر وآخرون (2016) في رسم خرائط السمات المناعية في بصمات الأصابع الخفية، وهي القدرة على استخراج تواقيع بروتينية من عينات ملوثة أو محطمة أو متناهية الصغر. وفي دراسة زانغ (2025) استخدمت هذه التقنيات لتصنيف الأفراد المصابين بأمراض معينة أو أصحاب الخلفيات المناعية المتشابهة بدقة عالية. كما تم استخدام تقنية تحليل المكونات الرئيسية في دراسة سيفي (2019) لتحويل آلاف المتغيرات المناعية إلى نمط بسيط يمكن للمحقق الجنائي استخدامه للمقارنة بين العينة المأخوذة من مسرح الجريمة وعينة المشتبه به.

في إطار توسيع التطبيقات المحتملة للبصمة المناعية، بدأت بعض الدراسات الحديثة في استكشاف إمكانية استخدامها في إعادة بناء سيناريوهات الأحداث الجنائية، وليس فقط تحديد هوية الأفراد. فعلى سبيل المثال، يمكن لتحليل أنماط مستقبلات الخلايا المناعية أن يوفر مؤشرات حول التعرضات البيئية أو العدوى الحديثة، مما قد يساعد في تحديد توقيت وقوع الحدث أو ربط المشتبه به بموقع معين. كما أن التغيرات الديناميكية في المستودع المناعي قد تعكس استجابة الجسم للإجهاد الحاد أو الإصابة، وهو ما يمكن أن يُستخدم كدليل داعم في التحقيقات الجنائية (باركر وآخرون 2021).

بالإضافة إلى ذلك، قد تُستخدم البصمة المناعية في التمييز بين أنواع العينات البيولوجية، خاصة في الحالات التي تكون فيها العينات مختلطة أو متدهورة، حيث يمكن لأنماط التعبير المناعي أن تعكس مصدر العينة أو حالتها الفيزيولوجية. ومع ذلك، فإن هذه التطبيقات لا تزال في مراحلها الأولية، وتتطلب المزيد من الدراسات التجريبية للتحقق من دقتها وقابليتها للتطبيق في البيئات الجنائية الواقعية.

5.1 التحدي التحليلي يمكن فهم الفرق الأساسي بين تحليل الحمض النووي وبصمة المناعة من خلال المقارنة:

الفرق بين البصمة الوراثية والبصمة المناعية يكمن في طبيعة البيانات. حيث يعتمد الحمض النووي على مطابقة نقاط محددة، بينما البصمة المناعية تعتمد على تحليل نظام كامل دائم التغير.

__ الحمض النووي: مطابقة مواقع محددة.

__ مجموعة المناعة: مقارنة توزيعات احتمالية عالية الأبعاد هذا يتطلب:

نماذج لتقليل الأبعاد، خوارزميات تشابه الشبكات وأطر احتمالية بايزية. وهذا ما يمنح الدليل صبغته القانونية والتي ناقشها الحكيم (2024) ودواس (2023). مما يعني أن المناعة احتمالية، فلا نقول أن هذا الشخص هو المتهم بنسبة 100% بشكل مباشر، بل نستخدم نظرية بايز لحساب النسبة الأرجحية. فهذا يحل مشكلة الديناميكية الزمنية، فهو يأخذ في الاعتبار احتمالات التغير الطبيعي في المناعة خلال الوقت.

تُعد التحديات التقنية المرتبطة بتحليل البصمة المناعية من أبرز العوائق التي تحد من تطبيقها العملي في المجال الجنائي، وذلك بسبب الطبيعة المعقدة والديناميكية للمستودع المناعي. فعلى عكس الحمض النووي، الذي يتميز بثبات نسبي، فإن البصمة المناعية تتأثر بعدة عوامل مثل العمر، والحالة الصحية، والتعرضات البيئية، مما يجعلها متغيرة بمرور الزمن (ميهو وآخرون 2018).

يُعد الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية في تحليل بيانات البصمة المناعية، نظرًا لقدرتها على التعامل مع البيانات عالية التعقيد. حيث تُستخدم خوارزميات التعلم الآلي لتحديد الأنماط المتكررة داخل المستودع المناعي، وبناء نماذج قادرة على التنبؤ بالهوية أو الحالة المناعية (فيدريتش وآخرون 2020).

ومن بين هذه الخوارزميات، تُستخدم الشبكات العصبية العميقة لتحليل التسلسلات المناعية، حيث يمكنها التعرف على الأنماط غير الخطية التي يصعب اكتشافها باستخدام الطرق التقليدية. كما تُستخدم خوارزميات مثل الآلات الداعمة والغابات العشوائية في تصنيف البيانات وتحديد السمات المميزة لكل فرد (غريف وآخرون 2015).

كما أن دمج البيانات المناعية مع تقنيات التعلم الآلي يفتح المجال لتطوير أنظمة ذكية قادرة على تحليل الأدلة البيولوجية بشكل شبه فوري، مما يعزز من كفاءة التحقيقات الجنائية في المستقبل.

ومن أبرز هذه التحديات، الأخطاء المرتبطة بتقنيات التسلسل الجيني عالي الإنتاجية، حيث قد تؤدي أخطاء القراءة أو أخطاء التضخيم إلى توليد تسلسلات غير دقيقة أو تضخيم بعض الأنماط على حساب أخرى، مما يؤثر على التمثيل الحقيقي للتنوع المناعي (روبينز 2013). كما أن مشكلة "قصور التمثيل العيني" تمثل تحديًا كبيرًا، حيث إن العينة البيولوجية قد لا تعكس كامل التنوع الموجود في الجسم، خصوصًا عند استخدام كميات صغيرة من المادة الحيوية.

إضافة إلى ذلك، تواجه عملية تحليل البيانات تحديات حسابية كبيرة، نظرًا للحجم الضخم للبيانات الناتجة عن التسلسل، والتي قد تصل إلى ملايين القراءات لكل عينة. ويتطلب ذلك استخدام خوارزميات متقدمة قادرة على معالجة البيانات بكفاءة عالية، مع الحفاظ على الدقة في تصنيف التسلسلات (غريف وآخرون 2015).

كما تبرز مشكلة إعادة إنتاج النتائج كأحد التحديات الأساسية، حيث قد تختلف النتائج بشكل ملحوظ عند استخدام منصات تسلسل مختلفة أو بروتوكولات مخبرية متباينة، مما يحد من إمكانية اعتماد هذه التقنية كدليل جنائي موثوق (ميهو وآخرون 2018).

في السنوات الأخيرة، برز توجه علمي متزايد نحو دمج البيانات المناعية مع تقنيات "متعددة الأوميكس"، مثل الجينوميات، والبروتيوميات، والميتابولوميات، بهدف الحصول على صورة أكثر شمولية ودقة عن الحالة البيولوجية للفرد. ويعتمد هذا النهج على فكرة أن كل طبقة من هذه البيانات تقدم بُعدًا مختلفًا من المعلومات، وأن دمجها يمكن أن يكشف عن أنماط لا يمكن ملاحظتها عند تحليل كل منها بشكل منفصل (هاسين وآخرون، 2017).

وفي سياق البصمة المناعية، يمكن أن يسهم هذا التكامل في تحسين دقة التمييز بين الأفراد، من خلال ربط أنماط المستقبلات المناعية بالتغيرات الجينية أو البروتينية المصاحبة. فعلى سبيل المثال، قد تساعد بيانات التعبير الجيني في تفسير بعض الأنماط المناعية، بينما يمكن أن تعكس البروتيوميات الحالة الوظيفية الفعلية للجهاز المناعي في وقت أخذ العينة.

كما أن دمج هذه البيانات قد يسهم في التغلب على بعض التحديات المرتبطة بالتباين الزمني، من خلال توفير مؤشرات إضافية تساعد في تحديد السياق البيولوجي للعينة. ومع ذلك، فإن هذا النهج يواجه تحديات تقنية كبيرة، تتعلق بدمج وتحليل كميات ضخمة من البيانات عالية التعقيد، بالإضافة إلى الحاجة إلى تطوير خوارزميات قادرة على التعامل مع هذا النوع من التحليل متعدد الأبعاد.

وعلى الرغم من هذه التحديات، فإن التكامل بين البصمة المناعية وتقنيات متعددة الأوميكس يمثل اتجاهًا واعدًا قد يسهم في نقل هذا المجال من مرحلة البحث إلى التطبيق العملي، خاصة في المجالات التي تتطلب دقة عالية في التمييز والتحليل، مثل الطب الجنائي.

6. التطبيقات الجنائية المحتملة:

تمثل البصمة المناعية ثورة وظيفية في التحقيقات الجنائية، فهي لا تجيب على سؤال "من ترك هذا الدليل؟"، بل أيضاً تجيب على "ما هو هذا الدليل؟" "وفي أي وقت تم تركه؟".

6.1 تحديد نوع العينة:

عملية تحديد نوع السائل البيولوجي (لعاب، دم، عرق، سائل منوي) هي خطوة حاسمة لربط المشتبه به بالجريمة. فالتقنيات التقليدية، كالاختبارات الأولية اللونية، حساسيتها ضعيفة، أما البصمة المناعية تقدم حلولاً جذرية مثل: التواقيع البروتينية المتخصصة، ففي دراسة هاربيسون وفليمينج (2016) أُثبت أن كل سائل بيولوجي يحتوي على بروفايل بروتيني مميز يعكس وظيفته المناعية. أما دراسة كين وآخرون (2024) فقد ناقشت أنه بإمكان المحققين التعرف على البروتينات حتى لو كانت العينة قديمة جداً أو مرت بظروف قاسية وتدهورت وذلك باستخدام مطياف الكتلة، مما يمكن من تحديد نوع السائل بدقة تامة. بينما في دراسة ليو وآخرون (2025) يمكن للبصمة المناعية من خلال تحليل المخزون المناعي في حالات الاعتداء التي تختلط فيها العينات والسوائل من شخصين مختلفين عزل البصمة الخاصة لكل شخص على حدة، مما يمنع ضياع الدليل بسبب اختلاط العينات. بينما قدمت دراسة دينينجر (2016) اختراعاً مبتكراً يتمثل في القدرة على كشف آثار الدم المخفية داخل بصمة الأصبع.

6.2 التمييز بين التوائم المتطابقة:

وعلى الرغم من هذه الميزة الجوهرية، فإن التمييز بين التوائم المتطابقة باستخدام البصمة المناعية لا يخلو من التعقيد، إذ إن درجة الاختلاف بين المستودعين المناعيين تعتمد بشكل كبير على مدى التباين في التعرضات البيئية بين التوأمين عبر الزمن. ففي الحالات التي يعيش فيها التوأمان في بيئات متشابهة ويتعرضان لنفس العوامل المناعية، قد تظهر درجة من التقارب في بعض مكونات المستودع المناعي، مما قد يقلل من وضوح الفروقات في التحليل الجنائي (دوبيك وآخرون 2021).

ومع ذلك، فإن الطبيعة العشوائية لعملية إعادة ترتيب المستقبلات المناعية، خاصة في مراحل التطور المبكرة للخلايا اللمفاوية، تضمن وجود مستوى أساسي من الاختلاف حتى في ظل ظروف بيئية متشابهة. ويعزز ذلك من فكرة أن البصمة المناعية لا تعتمد فقط على التعرضات الخارجية، بل أيضًا على عمليات داخلية غير موجهة تساهم في توليد التنوع المناعي.

ومن منظور تطبيقي، فإن استخدام هذه الفروق يتطلب تطوير نماذج تحليلية دقيقة قادرة على التمييز بين الاختلافات الجوهرية ذات الدلالة، وتلك الناتجة عن التباين الطبيعي داخل الجهاز المناعي. كما أن تحديد "عتبة الاختلاف" التي يمكن اعتبارها كافية للفصل بين التوأمين يمثل تحديًا إحصائيًا ومنهجيًا مهمًا في هذا المجال.

إضافة إلى ذلك، فإن تفسير هذه الفروقات في السياق الجنائي يتطلب دمج البيانات المناعية مع معلومات إضافية، مثل التاريخ الطبي أو نمط الحياة، لتعزيز قوة الاستدلال وتقليل احتمالية الخطأ. وبالتالي، فإن البصمة المناعية، رغم قدرتها الفريدة على التمييز بين التوائم المتطابقة، لا ينبغي استخدامها بشكل منفصل، بل ضمن إطار تكاملي يجمع بين عدة مصادر من الأدلة البيولوجية (إيمرسون وآخرون 2017).

يمثل هذا أحد أقوى الدوافع النظرية للبصمة المناعية. فبينما تعجز البصمة الوراثية عن التفريق بين التوائم المتطابقة، فإن الاختلاف في التعرضات البيئية قد يؤدي إلى تباين في المستودع المناعي. أثبتت دراسة دوبيك وآخرون (2021) بشكل قاطع أنه وبالرغم من التطابق الجيني الكامل للتوائم، فإن المخزون المناعي يختلف بشكل كلي. هذا الاختلاف بسبب التنوع الواصلي والنوكليوتيدات التي تحدث أثناء تشكل الخلايا التائية والبائية، فهي لا تخضع للوراثة، بل تحدث بشكل مستقل في جسم كل توأم. فالبصمة المناعية خلافاً للحمض النووي، تعمل كصندوق للذاكرة يسجل تاريخ التعرض للأمراض. على سبيل المثال، إذا أصيب أحد التوائم بالفيروس المضخم للخلايا كما في دراسة إيمرسون وآخرون (2017) ولم يصب الآخر، فإن بصمتهما المناعية ستتغير بشكل لا رجعة فيه. فهذه الميزة تمنح المحققين القدرة على تحديد هوية المتهم، بالإضافة إلى استبعاد أحد التوائم بناءً على تاريخه المرضي ولقاحاته.

6.3المقارنة التحليلية مع البصمة الوراثية:

تُعد البصمة الوراثية حجر الأساس في الأدلة البيولوجية الجنائية، نظرًا لثباتها العالي ودقتها في تحديد الهوية الفردية. إلا أن ظهور مفهوم البصمة المناعية قد أضاف بعدًا جديدًا يتجاوز التعريف التقليدي للهوية، حيث لا تقتصر هذه البصمة على الخصائص الجينية الثابتة، بل تعكس التفاعل الديناميكي بين الفرد وبيئته .من حيث المبدأ، يعتمد تحليل الحمض النووي على تسلسلات جينية ثابتة نسبيًا، لا تتغير إلا في حالات نادرة مثل الطفرات. وهذا ما يجعلها أداة موثوقة في التعرف على الأفراد، حتى بعد مرور فترات زمنية طويلة. في المقابل، تعتمد البصمة المناعية على تنوع المستقبلات المناعية التائية والبائية، والتي تتشكل نتيجة عمليات إعادة ترتيب جيني معقدة، بالإضافة إلى تأثيرات بيئية مستمرة.

ومن هذا المنطلق، يمكن القول إن البصمة الوراثية تقدم "هوية ثابتة"، بينما تقدم البصمة المناعية "هوية ديناميكية" تعكس الحالة البيولوجية للفرد في لحظة معينة. وهذا الاختلاف الجوهري يفتح المجال أمام استخدامات جديدة للبصمة المناعية، مثل تتبع التعرضات المناعية أو التنبؤ ببعض

الحالات الصحية، لكنه في الوقت نفسه يطرح تحديات تتعلق بالثبات وإعادة الإنتاج .كما أن البصمة المناعية قد توفر معلومات لا يمكن الحصول عليها من الحمض النووي، مثل التاريخ المناعي أو نوع الاستجابة المناعية، مما يجعلها مكملة وليست بديلة للأدلة الوراثية. وبالتالي، فإن التكامل بين هذين النوعين من البيانات قد يمثل مستقبل الأدلة البيولوجية في الطب الشرعي (كايزر وشنايدر، 2009).

ومع ذلك، فإن اعتماد البصمة المناعية في السياق الجنائي لا يزال محدودًا، بسبب الحاجة إلى مزيد من الدراسات التي تثبت موثوقيتها، بالإضافة إلى تطوير معايير تحليلية واضحة تضمن دقة النتائج.

المعيار	البصمة الوراثية	البصمة المناعية
الثبات	مرتفع	متوسط/متغير
التعقيد التحليلي	منخفض نسبيًا	مرتفع جدًا
القبول القضائي	معتمد عالميًا	غير معتمد
التمييز بين التوائم	غير ممكن	ممكن نظريًا

لتوضيح الإمكانات التطبيقية للبصمة المناعية، يمكن تصور عدة سيناريوهات جنائية واقعية. في أحد هذه السيناريوهات، يتم العثور على عينة دم متدهورة في مسرح جريمة، بحيث لا يكون الحمض النووي قابلاً للتحليل بسبب التعرض للحرارة أو العوامل البيئية. في هذه الحالة، يمكن استخدام تحليل البروتينات المناعية أو مستقبلات الخلايا التائية للكشف عن نمط مناعي مميز يمكن مقارنته بقاعدة بيانات مرجعية (باركر وآخرون 2021).

وفي سيناريو آخر، يتعلق الأمر بجريمة تشمل توأمين متطابقين، حيث تتطابق البصمة الوراثية لكليهما، مما يجعل التمييز بينهما باستخدام الحمض النووي أمرًا مستحيلاً. هنا يمكن للبصمة المناعية أن تلعب دورًا حاسمًا، حيث تختلف الأنماط المناعية نتيجة اختلاف التعرضات البيئية أو العدوى (دوبيك وآخرون 2021)

كما يمكن استخدام هذه التقنية في تحليل العينات المختلطة، مثل الحالات التي تحتوي على أكثر من مساهم بيولوجي، حيث تساعد الفروقات في الأنماط المناعية على فصل الإشارات وتحديد مساهمة كل فرد (كايزر ودي كنايف، 2011).

7. التحديات المنهجية العميقة وحدود القابلية القضائية:

رغم التقدم التقني الكبير في تحليل المستودع المناعي، فإن الفجوة المنهجية بين الإمكان البيولوجي والتطبيق الجنائي ما تزال واسعة. ويعود ذلك إلى أن تحويل أي تقنية حيوية إلى دليل قضائي معتمد لا يعتمد فقط على إثبات التفرد البيولوجي، بل يتطلب تحققًا منهجيًا صارمًا يشمل الثبات، وإعادة الإنتاج، ومعدلات الخطأ، وقابلية التطبيق في ظروف واقعية.

أول التحديات الجوهرية يتمثل في غياب الدراسات الطولية الممتدة التي تتابع استقرار المستودع المناعي لدى نفس الفرد عبر فترات زمنية طويلة وفي ظل ظروف بيئية ومناعية متغيرة. البصمة الوراثية تمتلك قواعد بيانات عالمية موحدة مثل الكوديس (CODES)، بينما تفتقر البصمة المناعية لبروتوكولات معيارية عالمية. فقد تختلف النتائج باختلاف التقنية المستخدمة، مثلاً الفروقات بين تسلسل الجيل القادم وما ناقشه ليو وآخرون (2025) حول تسلسل القراءة الطويل.

التحدي الثاني يرتبط بعدم وجود معدلات خطأ معيارية. في علم الأدلة الجنائية، لا يكفي أن تكون التقنية دقيقة بيولوجيًا؛ بل يجب أن يكون لها معدل خطأ معروف وقابل للقياس. وقد ساهم تطوير تحليل التكرارات القصيرة في الحمض النووي في إنشاء أطر احتمالية واضحة تعتمد على حساب نسبة الاحتمال. أما في حالة البصمة المناعية، فلا توجد حتى الآن تقديرات رسمية لمعدل الخطأ، أو احتمالية التطابق العشوائي، أو حدود الثقة الإحصائية عند مقارنة مستودعين مناعيين. وهذا الغياب لا يمثل نقصًا تقنيًا فحسب، بل عائقًا قانونيًا جوهريًا أمام القبول القضائي.

أما من الناحية الإجرائية، فلا تزال بروتوكولات التحليل غير موحدة. فلا توجد حتى الآن معايير دولية لتنقية العينات، أو تضخيم مستقبلات الخلايا التائية والبائية، أو تصفية الضوضاء الجزيئية، أو تطبيع التوزيعات التكرارية. ومع غياب التوحيد المعياري، يصبح من الصعب ضمان قابلية إعادة الإنتاج بين المختبرات المختلفة، وهي مسألة حاسمة في سياق الأدلة الجنائية.

إضافة إلى ذلك، لم تخضع البصمة المناعية لاختبارات كافية على عينات متدهورة أو منخفضة الجودة كما هو شائع في مسرح الجريمة. فالبيانات المناعية غالبًا ما تُستخلص في سياق بحثي من عينات دم طازجة ذات جودة عالية، بينما تتسم الأدلة الجنائية بكونها معرضة للحرارة والرطوبة والتحلل الأنزيمي والتلوث. إن غياب الدراسات التي تختبر متانة التسلسل المناعي في هذه الظروف يمثل فجوة تطبيقية كبيرة.

من القضايا الجوهرية التي تؤثر على إمكانية استخدام البصمة المناعية في المجال الجنائي مسألة الاستقرار الزمني للمستودع المناعي. فعلى عكس الحمض النووي، الذي يُعد ثابتًا نسبيًا طوال حياة الفرد، فإن البصمة المناعية تتسم بدرجة عالية من الديناميكية، حيث تتغير استجابةً للتعرضات البيئية المختلفة مثل العدوى، والتطعيمات، والحالات الالتهابية. ويعني ذلك أن التكوين المناعي للفرد في وقت معين قد لا يعكس حالته في وقت آخر، مما يطرح تساؤلات حول مدى إمكانية الاعتماد على هذه البيانات كدليل ثابت في التحقيقات الجنائية (روبينز، 2013).

وقد أظهرت دراسات متعددة أن بعض مكونات المستودع المناعي يمكن أن تبقى مستقرة نسبيًا على مدى فترات زمنية طويلة، خاصة تلك المرتبطة بالذاكرة المناعية، في حين أن مكونات أخرى تتغير بسرعة استجابةً للمحفزات البيئية. ويُعقد هذا التباين من عملية تفسير النتائج، حيث يتطلب فهمًا دقيقًا للسياق الزمني للعينة، بما في ذلك تاريخ التعرضات المناعية للفرد.

إضافة إلى ذلك، فإن العمر يلعب دورًا مهمًا في تشكيل البصمة المناعية، حيث يتغير تنوع المستقبلات المناعية مع التقدم في السن، نتيجة لانخفاض إنتاج الخلايا المناعية الجديدة وزيادة الاعتماد على الخلايا الذاكرية. وبالتالي، فإن أي تحليل جنائي يعتمد على البصمة المناعية يجب أن يأخذ في الاعتبار هذه العوامل الزمنية والديموغرافية، لضمان تفسير دقيق وموثوق للبيانات (ميهو آخرون، 2018).

وفي هذا السياق، تبرز الحاجة إلى تطوير نماذج تحليلية قادرة على دمج البعد الزمني ضمن تفسير البصمة المناعية، بحيث لا يتم التعامل معها كبيانات ثابتة، بل كنظام ديناميكي يعكس تفاعل الفرد مع بيئته عبر الزمن.

وأخيرًا، يبرز تحدٍ يتعلق بكيفية عرض هذا النوع من الأدلة أمام المحكمة. فالمستودع المناعي لا يُختزل في تتابع واحد يمكن عرضه بوضوح، بل في توزيع عالي الأبعاد من البيانات الإحصائية. إن ترجمة هذا التعقيد الحسابي إلى صيغة مفهومة وقابلة للتقييم القضائي تمثل تحديًا معرفيًا وقانونيًا في آن واحد.

إلى جانب التحديات البيولوجية والتقنية، تبرز مسألة الدقة والموثوقية كعنصر حاسم في تقييم صلاحية البصمة المناعية كدليل جنائي. ففي الأنظمة القضائية، يُشترط أن تكون الأدلة العلمية قابلة للتحقق، وقابلة لإعادة الإنتاج، وأن تتمتع بدرجة عالية من الدقة. إلا أن الطبيعة المعقدة والمتغيرة للبصمة المناعية تجعل من الصعب تحقيق هذه المعايير بشكل كامل في الوقت الحالي. فعلى سبيل المثال، قد تؤدي الاختلافات في طرق جمع العينات، أو تقنيات التحليل المستخدمة، أو حتى الخوارزميات الحسابية، إلى نتائج مختلفة عند تحليل نفس العينة. كما أن غياب بروتوكولات معيارية موحدة يزيد من احتمالية التباين في النتائج بين المختبرات المختلفة، مما يضعف من قوة الدليل في السياق القضائي (غريف وآخرون، 2015).

إضافة إلى ذلك، فإن تفسير البيانات المناعية يتطلب مستوى عاليًا من الخبرة، نظرًا لتعقيد الأنماط الناتجة وصعوبة ربطها بشكل مباشر بهوية الفرد أو سلوكه. وقد يؤدي هذا التعقيد إلى تحديات في عرض الأدلة أمام المحاكم، حيث يجب تبسيط النتائج دون الإخلال بدقتها العلمية، وهو ما يُعد تحديًا كبيرًا في حد ذاته.

لذلك، فإن اعتماد البصمة المناعية في التحقيقات الجنائية يتطلب تطوير معايير واضحة لضمان جودة البيانات، بالإضافة إلى تدريب المختصين على تفسيرها وتقديمها بطريقة علمية دقيقة ومفهومة في آن واحد (كايزر ودي كنايف، 2011).

8. الأبعاد الأخلاقية وحدود الخصوصية البيولوجية:

لا يمكن مناقشة إمكانات البصمة المناعية دون التوقف عند أبعادها الأخلاقية. فقد أظهرت دراسة ليو وآخرون (2025) أن البيانات المناعية قد تكون أكثر حساسية من الناحية الأخلاقية، إذ لا تقتصر على تحديد الهوية، بل قد تكشف عن التاريخ المرضي للفرد، وحالته المناعية، وربما مؤشرات على تعرضه السابق لأمراض معينة أو استجابته للقاحات. إن تحليل المستودع المناعي قد يحمل في طياته معلومات تتجاوز نطاق التحقيق الجنائي، لتلامس خصوصية الفرد الطبية والشخصية.

وعليه، فإن إدخال البصمة المناعية في النظام القضائي يثير تساؤلات عميقة:

هل يحق للسلطات الاطلاع على سجل التعرضات المناعية للفرد؟

وما هي الحدود الفاصلة بين تحديد الهوية واستكشاف المعلومات الصحية؟ هذا ما وصفه تيواري (2024) بـ "التلصص البيولوجي".

هذه الأسئلة تفرض ضرورة تطوير إطار تشريعي أكثر صرامة من ذلك المعمول به في تحليل الحمض النووي التقليدي، بحيث يُحدد نطاق الاستدلال المسموح به، وآليات تخزين البيانات، ومدة الاحتفاظ بها، وضوابط الوصول إليها.

يرى الحوامدة (2022) أن القوانين العربية الحالية لم تضع ضوابط لحماية البيانات الزائدة عن حاجة المحققين، مما يجعل البصمة المناعية سلاحاً ذا حدين قد يمس كرامة الأشخاص.

تُثير البصمة المناعية مجموعة من الإشكاليات الأخلاقية والقانونية المعقدة، والتي قد تكون أكثر حساسية من تلك المرتبطة بالبصمة الوراثية التقليدية. ويرجع ذلك إلى أن البيانات المناعية لا تقتصر على تحديد الهوية، بل قد تكشف أيضًا عن معلومات صحية حساسة، مثل تاريخ الإصابة بالأمراض، أو الاستجابة المناعية، أو حتى الاستعداد للإصابة بأمراض معينة (إيمرسون وآخرون، 2017).

ومن أبرز المخاوف الأخلاقية، مسألة الخصوصية البيولوجية، حيث يمكن أن يؤدي تحليل المستودع المناعي إلى استنتاجات تتجاوز الهدف الجنائي، مثل الكشف عن الحالة الصحية للفرد دون موافقته. وقد أظهرت دراسات سابقة إمكانية استخدام بيانات مستقبلات الخلايا التائية لتحديد التعرضات السابقة للفيروسات، مثل الفيروس المضخم للخلايا، مما يثير تساؤلات حول حدود استخدام هذه البيانات (إيمرسون وآخرون، 2017).

كما أن استخدام البصمة المناعية في السياق الجنائي يطرح تحديات قانونية تتعلق بمدى قبولها كدليل في المحكمة. فحتى الآن، لا توجد معايير قانونية واضحة لتنظيم استخدام هذه التقنية، كما أن طبيعتها الاحتمالية قد تجعل من الصعب تقديمها كدليل قاطع مقارنة بالبصمة الوراثية (كايزر ودي كنايف، 2011).

إضافة إلى ذلك، فإن خطر إساءة استخدام البيانات يمثل تحديًا حقيقيًا، حيث يمكن استغلال المعلومات المناعية لأغراض غير قانونية، مثل التمييز الصحي أو التأميني، مما يستدعي تطوير أطر تنظيمية صارمة لحماية الأفراد (جيمريك وآخرون، 2013).

9. الفجوة التحويلية بين البحث والتطبيق:

رغم النضج التقني في مجال تسلسل مستقبلات الجهاز المناعي، فإن البصمة المناعية لا تزال في مرحلة ما يُعرف بـ البحث التطبيقي التحويلي. فهناك فرق جوهري بين إثبات التفرد في بيئة بحثية محكومة، وبين تحويل هذا التفرد إلى دليل قضائي معتمد. يتطلب تحليل البصمة المناعية التعامل مع بيانات عالية الأبعاد، حيث يمكن أن يحتوي المستودع المناعي للفرد الواحد على ملايين التراكيب المختلفة من المستقبلات المناعية. ويجعل هذا التعقيد من الضروري استخدام أدوات إحصائية متقدمة قادرة على استخراج الأنماط ذات الدلالة من بين كم هائل من البيانات.

ومن بين الأساليب المستخدمة في هذا المجال، تحليل التنوع، والذي يهدف إلى قياس مدى تنوع المستقبلات المناعية داخل العينة. كما تُستخدم تقنيات مثل تحليل الكثافة، ونماذج الاحتمالات، وخوارزميات التعلم الآلي لتحديد الأنماط المشتركة أو المميزة بين الأفراد.

كما أن استخدام مقاييس مثل الإنتروبيا الشانونية ومؤشر سيمبسون يتيح تقييم درجة التنوع المناعي بطريقة كمية، مما يساعد في مقارنة العينات المختلفة. إلا أن تفسير هذه المقاييس في السياق الجنائي يتطلب حذرًا، نظرًا لاحتمالية تأثرها بعوامل متعددة مثل العمر، والحالة الصحية، والتعرضات البيئية (غريف وآخرون، 2015).

إضافة إلى ذلك، فإن التحدي لا يقتصر على تحليل البيانات، بل يشمل أيضًا تمثيلها بشكل واضح ومفهوم، خاصة عند تقديمها كدليل في المحاكم. وهذا يتطلب تطوير أدوات تمثيل بصري للبيانات قادرة على تبسيط الأنماط المعقدة دون فقدان المعلومات الأساسية.

وبالتالي، فإن الجانب الإحصائي يُعد عنصرًا أساسيًا في تحويل البصمة المناعية من بيانات خام إلى معلومات قابلة للاستخدام في السياق الجنائي.

تتجلى الفجوة التحويلية في ثلاثة مستويات مترابطة:

1. المستوى العلمي:

لا تزال الحاجة قائمة لدراسات تحقق واسعة النطاق تشمل عينات متنوعة، وفترات زمنية ممتدة، وظروف بيئية مختلفة.

2. المستوى الإحصائي:

غياب إطار احتمالي جنائي مكافئ لنموذج نسبة الاحتمال للتكرارات الترادفية القصيرة للحمض النووي.

3. المستوى القانوني:

عدم وجود سوابق قضائية أو معايير قبول واضحة لهذا النوع من الأدلة.

وبالتالي، فإن البصمة المناعية تقف اليوم عند مفترق طرق بين الإمكان البيولوجي الواعد والتطبيق القضائي غير المكتمل.

10. نحو نموذج هوية بيولوجية متعدد الطبقات:

عند مقارنة البصمة المناعية بالبصمة الوراثية التقليدية، يتضح أن لكل منهما خصائص تميزها وتحدد نطاق استخدامها. فالحمض النووي يتميز بالثبات والاستقرار، مما يجعله معيارًا ذهبيًا في تحديد الهوية، خصوصًا في الحالات التي تتطلب دقة عالية (كايزر ودي كنايف، 2011). في المقابل، تتميز البصمة المناعية بطابعها الديناميكي، حيث تعكس التغيرات البيئية والتاريخ المناعي للفرد.

ومن حيث الدقة، فإن البصمة الوراثية توفر مستوى عالٍ من التمييز، خاصة عند استخدام تقنيات التكرارات الترادفية القصيرة، إلا أنها تواجه صعوبات في حالات التوائم المتطابقة. وهنا تظهر أهمية البصمة المناعية، التي يمكن أن توفر مستوى إضافيًا من التمييز بناءً على الاختلاف في التعرضات المناعية (دوبيك وآخرون، 2021).

أما من الناحية التطبيقية، فإن البصمة المناعية قد تكون أكثر فائدة في الحالات التي يتدهور فيها الحمض النووي، حيث يمكن لبعض البروتينات أو المؤشرات المناعية أن تبقى مستقرة لفترات أطول (باركر وآخرون، 2021). ومع ذلك، فإن تعقيد تحليل البيانات المناعية يمثل عائقًا أمام استخدامها الواسع .وبالتالي، فإن التكامل بين الطريقتين يمثل الاتجاه الأكثر واقعية، حيث يمكن استخدام الحمض النووي لتحديد الهوية الأساسية، بينما تُستخدم البصمة المناعية لإضافة بعد وظيفي وزمني يعزز من قوة الدليل الجنائي.

إن طرح البصمة المناعية كبديل مباشر للبصمة الوراثية قد يكون تبسيطًا مخلًا. فالأكثر واقعية هو تصور نموذج تكاملي يعيد تعريف الأدلة البيولوجية بوصفها متعددة الطبقات.

في هذا النموذج:

- يظل الحمض النووي الإطار الأساسي لتحديد الهوية الجينية الثابتة.
- يوفر المستودع المناعي بعدًا ديناميكيًا يعكس التاريخ البيئي والمرضي.
- تسهم البروتيوميات في تحديد مصدر العينة البيولوجية.

هذا التكامل لا يعني تراكم الأدلة فحسب، بل إعادة صياغة مفهوم الهوية البيولوجية من كيان أحادي البعد إلى بنية متعددة الأبعاد تجمع بين الثبات والتغير، بين الوراثي والمكتسب، وبين الجينوم والذاكرة المناعية.

إن مستقبل العلوم الجنائية قد لا يقوم على استبدال نموذج بآخر، بل على توسيع الإطار المفاهيمي ليشمل طبقات بيولوجية متعددة تُثري عملية الاستدلال الجنائي وتزيد من دقتها، مع الحفاظ في الوقت ذاته على الضوابط المنهجية والأخلاقية الصارمة.

الخلاصة العامة:

يتم إجراء هذا البحث بالاعتماد على المنهج التحليلي، من خلال تحليل ومراجعة الأدبيات والأبحاث العلمية والدراسات المتعلقة بتكنولوجيا الكشف المناعي وتطبيقها في التحقيقات الجنائية لتحديد الهوية الحيوية في سياق التعرف على الأفراد. تم النظر فقط في الجوانب النظرية وتحليل المفاهيم الأساسية المرتبطة بالبصمة المناعية، ومحاولة توضيح فوائد تكنولوجيا الكشف المناعي، وكيفية الاستفادة منها، وفحص تطبيقها، مثلاً في المجال الجنائي، وذلك بهدف بناء فكر علمي كامل حول هذا المجال.

أعتقد أن بصمة المناعة هي أداة واعدة ووسيلة ذات فوائد مستقبلية كبيرة خصيصاً عند دمجها مع البصمة الوراثية. هذا الاندماج يمكن أن يزيد من دقة وموثوقية الأدلة في تحديد هوية الأفراد. تعد البصمة الوراثية وسيلة أساسية ومثبتة علمياً، إلا أن البصمة المناعية ستكون مكملة للبصمة الوراثية التقليدية من خلال توفير معلومات يمكن أن تعزز من قوة الأدلة.

هذا البحث يؤكد على أن يكون هناك أطر أخلاقية وقانونية تنظم استخدام هذه البيانات، مما يشمل على حماية خصوصية الأفراد، ومنع سوء الاستخدام لهذه البيانات البيولوجية. سيساعد ذلك في جعل نتائج الاختبارات تستخدم كأساس موثوق به في المحاكم. من هذا المنطلق، تكمل البصمة المناعية البصمة الوراثية ولكنها لا تحل محلها، لكن تعزز من دقة الأدلة العلمية وبالأخص عند دمجها مع تقنية البروتيوميات والتقنيات الجينية للجيل القادم، مما يسهم في تطوير تقنيات العدالة الجنائية. نهدف إلى تقديم إطار نظري متكامل يوضح أهمية تكنولوجيا الكشف المناعي وإمكانياتها المستقبلية، مع ضرورة التوازن بين التطور العلمي والمحافظة على المبادئ الأخلاقية والقانونية في مجال التحقيقات الجنائية.

بدلاً من النظر إلى البصمة المناعية كبديل للبصمة الوراثية التقليدية، يمكن تصورها كجزء من نموذج تكاملي متعدد الطبقات للهوية البيولوجية. ففي حين يوفر الحمض النووي معلومات ثابتة عن الهوية الجينية للفرد، تقدم البصمة المناعية بُعدًا ديناميكيًا يعكس التفاعلات البيئية والتاريخ المناعي. وقد يسهم دمج هذين المصدرين من البيانات في تعزيز دقة التحليل الجنائي، خاصة في الحالات المعقدة التي تتطلب تفسيرًا أعمق للظروف المحيطة بالحدث.

ويُتوقع أن يشكل هذا التكامل بين البيانات الجينية والمناعية أحد الاتجاهات المستقبلية في تطوير الأدلة البيولوجية، حيث يمكن أن يوفر إطارًا أكثر شمولية لفهم الهوية البشرية في سياقها البيولوجي والزمني (غريف وآخرون، 2015).

مع التقدم السريع في تقنيات التسلسل الحيوي والتحليل الحاسوبي، يتوقع أن يشهد مجال البصمة المناعية تطورًا ملحوظًا خلال السنوات القادمة، مما قد يعزز من إمكانية تطبيقه في السياق الجنائي. ومن بين الاتجاهات البحثية الواعدة، تطوير تقنيات تسلسل أكثر دقة وأقل تكلفة، تتيح تحليل المستودع المناعي على نطاق واسع وبجودة عالية، مما يسهم في تحسين موثوقية النتائج وتقليل التباين بين الدراسات المختلفة .كما يُتوقع أن تلعب تقنيات الذكاء الاصطناعي دورًا متزايد الأهمية في تحليل البيانات المناعية، من خلال تطوير نماذج قادرة على التعرف على الأنماط المعقدة وربطها بالسمات البيولوجية أو السلوكية للفرد. وقد أظهرت بعض الدراسات الأولية قدرة هذه النماذج على تصنيف الأفراد أو التنبؤ بحالات مرضية معينة بناءً على بيانات المستقبلات المناعية، مما يشير إلى إمكانات كبيرة في هذا المجال (غريف وآخرون، 2015).

إضافة إلى ذلك، فإن تطوير قواعد بيانات مناعية شاملة ومعيارية سيسهم في تعزيز إمكانية استخدام هذه البيانات في المقارنات الجنائية، شريطة مراعاة الجوانب الأخلاقية والقانونية المرتبطة بحماية الخصوصية .ومع ذلك، فإن تحقيق هذه الرؤية يتطلب تضافر الجهود بين الباحثين، والمختصين في الطب الشرعي، وصناع القرار، لضمان تطوير هذا المجال بطريقة علمية ومنظمة، تأخذ في الاعتبار التحديات التقنية والأخلاقية المرتبطة به. وبالتالي، فإن مستقبل البصمة المناعية في المجال الجنائي يعتمد بشكل كبير على مدى القدرة على تحويل هذه الإمكانات النظرية إلى تطبيقات عملية موثوقة.

الخاتمة:

ختاماً، البصمة المناعية من الاكتشافات الرائعة التي أثبتت لنا أن جسم الإنسان يسجل ويخزن كل ما يمر به من ظروف، سواء كانت ظروف بيئية أو ظروف تعرضه للأمراض والفيروسات والبكتيريا، فقد أثبتت الدراسات المتسلسلة أن المناعة ليست مجرد خط دفاعي للجسم، فقد تركت بصمة خاصة في جهاز الإنسان المناعي أشبه بـ "السجل التاريخي" لكل شخص يعكس مسيرة الفرد المناعية عبر الزمن وليس مجرد استجابة آنية معزولة.

في السنوات الماضية، نجحت الدراسات العلمية والأبحاث (منذ دراسات دينينجر في 2016 انتهاءً بتقنيات القراءة الطويلة لـ ليو في 2025) في إثبات تفوق البصمة المناعية على البصمة الوراثية التقليدية في مواقع محددة، وذلك من خلال قدرتها على التمييز بين التوائم المتطابقة وراثياً، بالإضافة إلى عرض وتقديم سجل زمني للتعرضات المرضية دون أن يعني ذلك تفوقًا مطلقًا أو إمكانية استبدال البصمة الوراثية في السياق الجنائي الحالي. ولكن مع ذلك، يوجد هناك بعض التحديات التي تتعلق بتأثر البصمة المناعية بالزمن والظروف البيئية، إضافةً إلى صعوبة فك شفراتها مما يحد من قابليتها للاعتماد القضائي في الوقت الراهن.

البصمة المناعية ليست بديل للبصمة الوراثية، بل مكملة لها. فعند دمج علم البروتيوميات مع التقنيات الجينية للجيل القادم سيفتح طريقا جديدا لتحقيق العدالة الجنائية بدقة أكثر وفهم أعمق ضمن نموذج متكامل متعدد الطبقات يجمع بين الهوية الجينية الثابتة والذاكرة المناعية الديناميكية.

التوصيات:

يمكن صياغة التوصيات بناءً على النتائج التي توصلت إليها الدراسة كالتالي:

1- تطوير وتعديل القوانين ونظام الإجراءات الجزائية للاعتراف بالدليل المشفر كدليل قاطع في المحاكم ضمن إطار تقنيني مرحلي يعتمد على التحقق العلمي التدريجي وليس الاعتراف المباشر بها كدليل قاطع.

2- اختبار البصمة المناعية في ظروف حقيقية (مثل العينات التالفة أو التي تعرضت لحرارة الشمس) للتأكد من استقرارها وثباتها مما يمنح القدرة على استخراجها في مسرح الجريمة وتحديد حدود استخدامها العملي.

3- وضع دليل عمل موحد لجميع المختبرات الطبية والجنائية لتحليل البصمة المناعية بنفس الطريقة التقنية، لضمان دقة نتائجها أمام وتقليل التباين بين التقنيات المختلفة

4- دمج البصمة المناعية مع البصمة الجينية والبروتينية لتقليل الخطأ وتعزيز قوة الدليل البيولوجي ضمن نموذج تكاملي متعدد المصادر.

5- يجب وضع قوانين لجمع البيانات المناعية وتخزينها للحفاظ عليها ومنع سوء استخدامها خصوصًا ما يتعلق بالكشف عن التاريخ المرضي أو الحالة الصحية.

6- دراسة كيفية تغير مناعة الإنسان مع تقدم العمر، لمقارنتها ومعرفة هل ستكون مطابقة لصاحبها مع مرور الزمن ودعم استخدامها في المقارنات الزمنية.

7- تطوير نماذج إحصائية معيارية (مثل النماذج البايزية) لتفسير نتائج البصمة المناعية وتقدير قوة الدليل بشكل كمي يمكن قبوله قضائيً.

8- إنشاء قواعد بيانات مناعية مرجعية واسعة النطاق، مشابهة لقواعد بيانات الحمض النووي، لدعم المقارنات الجنائية وتحسين دقة التفسير.

9- الاستفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في تحليل الأنماط المناعية عالية الأبعاد وتحويلها إلى مؤشرات قابلة للاستخدام الجنائي.

10- تطوير آليات مبسطة لعرض الأدلة المناعية المعقدة أمام المحاكم بطريقة مفهومة تدعم اتخاذ القرار القضائي.

قائمة المراجع

أولًا: المراجع العربية:

1- رباب مصطفى عبد المنعم الحكيم (2024). حجية البصمة الوراثية في الإثبات الجنائي.

2- لورنس الحوامدة (2022). البصمة الوراثية ودورها في الإثبات الجنائي: دراسة تحليلية مقارنة.

3- م م ردام عزاوي دواس (2023). البصمة الوراثية ودورها في الإثبات الجنائي.

ثانيًا: المراجع الأجنبية:

1• Deininger, L., Patel, E., Clench, M. R., Sears, V., Sammon, C. & Francese, S. (2016). Proteomics goes forensic: Detection and mapping of blood signatures in fingermarks. Proteomics, 16(11-12), pp. 1707–1717.
2• Dupic, T., Bensouda Koraichi, M., Minervina, A., Pogorelyy, M. V., Mora, T. & Walczak, A. M. (2020). Immune fingerprinting through repertoire similarity. Nature Communications, 11(1), 4221.
3• Dupic, T., Bensouda Koraichi, M., Minervina, A. A., Pogorelyy, M. V., Mora, T. & Walczak, A. M. (2021). Distinguishing between monozygotic twins' blood samples through immune repertoire sequencing. PLOS Computational Biology, 17(3), e1008871.
4• Dupic, T., Marcou, Q., Walczak, A. M. & Mora, T. (2021). Genesis of the αβ T-cell receptor repertoire. PLOS Computational Biology, 17(3), e1008871.
5• Emerson, R. O., DeWitt, W. S., Vignali, M., Gravley, J., Hu, J. K., Osborne, E. J., Desmarais, C., Klinger, M., Carlson, C. S., Hansen, J. A., Rieder, M. & Robins, H. S. (2017). Immunosequencing identifies signatures of cytomegalovirus exposure history and HLA-mediated effects on the T cell repertoire. Nature Genetics, 49(5), pp. 659–665.
6• Fleming, R. I. & Harbison, S. A. (2016). Forensic body fluid identification: State of the art. Forensic Science International: Genetics, 10, pp. 33-41.
7• Greiff, V., Miho, E., Menzel, U. & Reddy, S. T. (2015). Bioinformatic and statistical analysis of adaptive immune repertoires. Trends in Immunology, 36(11), pp. 738–749.
8• Gymrek, M., McGuire, A. L., Golan, D., Halperin, E. & Erlich, Y. (2013). Identifying personal genomes by surname inference. Science, 339(6117), pp. 321–324.
9• Hasin, Y., Seldin, M. & Lusis, A. (2017). Multi-omics approaches to disease. Genome Biology, 18(1), 83.

10• Kayser, M. & de Knijff, P. (2011). Improving human forensics through advances in genetics, genomics and molecular biology. Nature Reviews Genetics, 12(3), pp. 179–192.
11• Kayser, M. & Schneider, P. M. (2009). DNA-based prediction of human externally visible characteristics in forensics: Motivations, scientific challenges, and ethical considerations. Forensic Science International: Genetics, 3(3), pp. 154–161.
12• Keane, R. E., Tidy, R. J., Parker, G. J., Gummer, J. P. A. & Priddis, C. (2024). Mass spectrometry-based proteomics: Changing the impact of protein analysis in forensic science. Forensic Science International, 354, 111893.
13• Luo, X., Zhang, L., Li, Y., Li, C., Sun, G., Zhang, C., Yu, F., Lv, H., Liu, M., Cui, H., Cai, D., Zou, L., Ma, J. & Xiao, F. (2025). Full-length immune repertoire reconstruction and profiling at the transcriptome level using long-read sequencing. Briefings in Bioinformatics, 26(1), bbae553.
14• Mhanna, V., Bashour, H., Lê Quý, K., Barennes, P., Rawat, P., Greiff, V. & Mariotti-Ferrandiz, E. (2024). Adaptive immune receptor repertoire analysis. Nature Reviews Methods Primers, 4(1), 11.
15• Miho, E., Yermanos, A., Weber, C. R., Berger, C. T., Reddy, S. T. & Greiff, V. (2018). Computational strategies for dissecting the high-dimensional complexity of adaptive immune repertoires. Frontiers in Immunology, 9, 224.
16• Parker, J., et al. (2021). Emerging forensic applications of immunological biomarkers. International Journal of Legal Medicine, 135(1), pp. 31-44.
17• Robins, H. (2013). Immunosequencing: applications of immune repertoire deep sequencing. Current Opinion in Immunology, 25(5), pp. 646–652.
18• Sevy, A. M., Soto, C., Bombardi, R. G., Meiler, J. & Crowe Jr, J. E. (2019). Immune repertoire fingerprinting by principal component analysis reveals shared features in subject groups with common exposures. Frontiers in Immunology, 10, 217.
19• Tiwari, P. (2024). Legal and ethical considerations in the use of DNA fingerprinting. Journal of Forensic Research, 15(1), 1000657.
20• Widrich, M., Schäfl, B., Pavlović, M., Sandve, G. K. & Hochreiter, S. (2020). Modern machine learning for immunology. Trends in Immunology, 41(11), pp. 1018-1033.
21• Zhang, R., Chen, M., Ye, F., Meng, D., Huang, Y. & Liu, X. (2025). Classification of autoimmune diseases from TCR repertoires by multi-instance learning. Bioinformatics, 41(1), btae645.