

אנליזה של דנ"א למטרות פורנויות

נידה גלילי* ואסא מדבך**

א. מבוא

אנליזה של החומר התורשתי (דנ"א) למטרות פורנויות מאפשרת שיוך של חומר ביולוגי ממוצגים, הקשורים לעבירה, לחומר שנדגם מאנשים המעורבים במקרה (מתלוננים וחשודים), ברמת ספציפיות גבוהה ביותר. כשיטה זו ניתן, לעיתים, להגיע למסקנה גם במקרים בהם השיטות הביוכימיות המקובלות, המבוססות על בדיקת אנזימים וקבוצות דם, אינן אפשריות, או שתוצאותיהן אינן מספקות, ולכן הולכת ותופשת השיטה מקום נכבד במעבדות הביולוגיה הפורנויות ברחבי תבל.

לדעתנו, לא ניתן להעריך נכונה את משקלן של ראיות שתושגנה כשיטה זו ללא הבנת הרקע הביולוגי של השיטה וכן הכרת השלבים השונים בביצועה. לכן, מטרת המאמר היא להציג בפני הקורא שאינו ביולוג מקצועי את הרקע לשיטה ועקרונותיה, לפרט את התועלת שניתן להפיק ממנה בשלבי החקירה וההליך המשפטי, ולהביא מעט מניסיוןן של מעבדות ומערכות שיפוט במדינות אחרות.

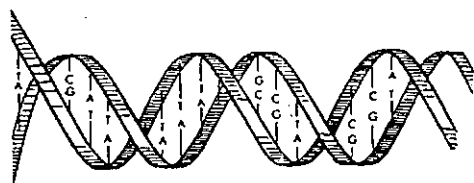
ב. מבנה הדנ"א

הדנ"א (D.N.A. Deoxyribonucleic acid) הוא החומר התורשתי המצוי בכל תא ותא בגוף האדם. הדנ"א מורכב מארבע אבני יסוד, הנקראות בסיסים. הבסיסים מצטרפים זה לזה ויוצרים סרט ארוך כחרוזים בשרשרת. ארבעת הבסיסים מסומנים באותיות A, G, C, T, שהן תחילת שמם הלועזי. לסדר הבסיסים ברצף יש משמעות ביולוגית והגיוון ברצפים הוא גדול מאוד.

בתא, בנוי הדנ"א משני סרטים, הכרוכים זה סביב זה בצורה סלילית (דנ"א דו-סרטי). רצף הבסיסים בסרט אחד מותנה ברצף הבסיסים בסרט הנגדי לו על פי החוקיות הבאה: מול כל בסיס A בסרט אחד, ימצא בסיס T בסרט השני ומול כל בסיס C בסרט אחד, ימצא בסיס G בסרט השני, וכן הדבר לגבי T ו-G בסרט האחד, שמולם ימצאו A ו-C בסרט השני בהתאמה. (ציור 1). הבסיסים, הנמצאים זה מול זה בשני הסרטים, קשורים זה לזה בקשרים כימיים, התורמים ליציבות המבנה הסלילי של שני הסרטים. סרטי הדנ"א, הקשורים ביניהם בצורה זו, נקראים סרטים קומפלמנטריים (משלימים), כי כאשר נתון

* פקד, מוסמך בביולוגיה, המעבדה לביולוגיה פורנויות, המחלקה לזיהוי פלילי, משטרת ישראל.
** סניצ, ד"ר, ראש המעבדה לביולוגיה פורנויות, המחלקה לזיהוי פלילי, משטרת ישראל.

רצף בסיסים של סרט אחד ניתן לקבוע לפיו את רצף הבסיסים של הסרט שמולו.¹ תכונה זו של השלמת בסיסים בהתאמה בין שני סרטי הדנ"א, היא המאפשרת את ביצוע הבדיקה של הדנ"א, כי בעזרתה נוכל לאתר רצפים ספציפיים בתוך הדנ"א, כפי שיוסבר בהמשך. (ציור 1).



ציור 1: סכמה של מבנה הדנ"א

בתא, מאורגן הדנ"א במיכנים הנקראים כרומוזומים. כתאי הגוף, באדם, נמצא 46 כרומוזומים ובתאי המין (תא זרע או ביצית) 23 כרומוזומים. בעת הפריית הביצית ע"י הזרע, התא שנוצר מהם מכיל 46 כרומוזומים (23 זוגות). כל זוג כרומוזומים כזה בנוי מכרומוזום אחד שמקורו באם ואחד שמקורו באב, ולכן הם נקראים כרומוזומים הומולוגיים. מכאן, שמחצית מהחומר התורשתי בכל תא ותא בגופנו מקורה באב, והמחצית השנייה מקורה באם.²

רצף הבסיסים בדנ"א זהה בכל תא מגופנו, ומכיל את כל האינפורמציה הגנטית הדרושה לבניית הגוף. כיום, נמצא כי רק כ-5% מכלל הדנ"א מכילים אינפורמציה זו, ותפקיד שאר הדנ"א (95%), אינו ברור.³

ככלל, רצף הבסיסים בדנ"א הינו קבוע.⁴ באותם מקרים, בהם יש שינויים ברצף, שכחותם בחלק הדנ"א המכיל אינפורמציה לבניית הגוף נמוכה מאוד, כי נוכחות שינוי כזה גורמת לשינוי באינפורמציה ועלולה לפגוע בתפקודו של הגוף (כגון מחלה על רקע תורשתי)⁵ ואף לגרום למוות מוקדם. לעומת זאת, אין השפעה תפקודית לשינויים באיזורים שבהם אין אינפורמציה לבניית הגוף. איזורים אלה עברו, לכן, במהלך

1. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel "An Introduction to the Methods of DNA Analysis Under Investigation in the FBI Laboratory" 15 *Crime Lab. Digest* 8 (1988).
2. F. Baechtel "A Primer on the Methods Used in the Typing of DNA" 15 (Suppl. 1) *Crime Lab. Digest* (1988) 3.
3. K. Zang & N. Blin "Recombinant DNA Technology and Human DNA Polymorphism", in 2 *Adv. Forens. Haemogent.* W. Mayer, ed. (Berlin, 1988) 311; J. Thornton "DNA Profiling" Nov. 20 *Chemical & Engineering News* (1989) 18.
4. J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding "Repetitive Deoxyribonucleic Acid (DNA) and Human Genome Variation - a Concise Review Relevant to Forensic Biology" 33 *J. Forensic Sci.* (1988) 1111.
5. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1.

האבולוציה, שינויים רבים, ורצף הבסיסים בהם עשוי להיות שונה בין אדם לאדם.⁶ במקרה כזה מתקבלת באוכלוסיה שונות צורתית (פולימורפיות polymorphism) באזורים אלה בדנ"א. אזורים כאלה, שעברו שינויים, נקראים לכן אתרים פולימורפים. ככל שנאתר מספר רב יותר של אתרים פולימורפים נוכל להבדיל באופן יחודי בין מספר רב יותר של אנשים. קיום השונות ברצף הבסיסים הוא הסיבה לשמוש באנליזה של דנ"א כשיטה לאבחנה בין אנשים שונים.

השינויים ברצף הדנ"א באנשים שונים יכולים להיות מזעריים, כגון שינוי של בסיס אחד (מוטציה mutation).⁷ צורה אחרת של שינויים בדנ"א מבוססת על יחידת רצף בסיסים מסוים, החוזרת על עצמה באנשים שונים מספר שונה של פעמים. יחידות הרצף החוזרות קשורות זו בזו בטור (tandem repeats).⁸ בדנ"א יש למעלה מ-1500 אזורים כאלו, אשר נבדלים ביניהם ברצף של היחידה החוזרת על עצמה.⁹ איזורים אלו ממוקמים באתרים מסוימים, קבועים וידועים בכרומוזומים ההומולוגיים ונקראים Variable number tandem repeats (VNTR).¹⁰ מטרת האנליזה של הדנ"א היא זיהוי האתרים הפולימורפים ששונותם נובעת מיחידות חוזרות כאלה (VNTR), כפי שיתואר בהמשך.

ג. אופן בדיקת הדנ"א

להלן יתוארו השלבים העקריים בביצוע בדיקת הדנ"א לצורך קביעת השונות בין דנ"א ממקורות שונים. השיטה מבוססת על מיצוי הדנ"א מהתאים, פירוקו למקטעים, זיהוי מקטעים בעלי אתרים פולימורפים בעזרת גלאי רדיואקטיבי ורישום התוצאות לצורך השוואה עם דנ"א ממקורות אחרים.

החומר שמגיע לבדיקה כולל מוצגים הקשורים לעבירה ודוגמאות להשוואה, שמתקבלות מאנשים הקשורים לכאורה במקרה. המוצגים יכולים להיות פריטי לבוש, פיסות עץ מתכת או אבן, כלי נשק וכד', ועליהם להכיל כתמים של דם, זרע, רוק או חלקי רקמה. הדוגמאות להשוואה מאנשים הן בד"כ דוגמאות דם.

1. מיצוי הדנ"א

המיצוי נעשה ע"י תמיסות מיוחדות המופעלות על חומר תאי שנמצא בכתם, על מוצג או בדוגמא שמתקבלת מאדם שנבדק.¹¹ בסוף התהליך (הנמשך יום) מתקבל דנ"א חפשי כמעט מזיהומים של חמרים אחרים.

6. J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4.

7. *ibid*.

8. J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4; A. Jeffreys "Highly Variable Minisatellites and DNA Fingerprints" 15 *Biochem. Soc. Trans.* (1987) 309.

9. *ibid*.

10. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtzel, *supra* note 1; J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4.

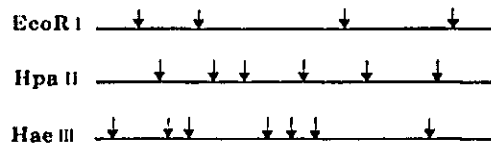
11. *Procedures for the Detection of Restriction Fragment Length Polymorphisms in Human DNA* (Forensic Science Research and Training Section, FBI Academy, Quantico, Virginia, USA).

2. חיתוך הדנ"א

מולקולת הדנ"א ארוכה מאוד ומורכבת מביליון בסיסים,¹² לכן יש לפרקה לקטעים קטנים יותר, ע"י חיתוך. החיתוך אינו אקראי אלא נעשה בנקודות קבועות וידועות באמצעות מרכיבים ביולוגיים טבעיים, הנקראים אנזימי חתוך, או אנזימי רסטריקציה (restriction enzymes).

3. אנזימי רסטריקציה ומקטעי רסטריקציה

אנזים רסטריקציה מתאפיין בכך, שהוא מכיר אתרי חיתוך יחודיים לו על גבי הדנ"א (אתרי רסטריקציה). אתר החיתוך בנוי מרצף בסיסים מסוים, קצר, שאותו יכול האנזים לזהות. האנזים חותך את הדנ"א באתרים אלה בלבד למקטעים (מקטעי רסטריקציה), השונים זה מזה באורכם, כלומר במספר הבסיסים מהם הם מורכבים.¹³ (ציור 2).



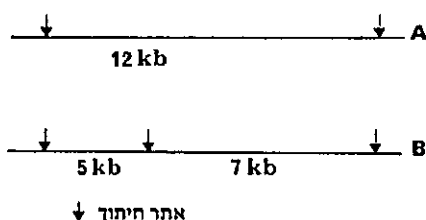
ציור 2: חיתוך באנזימי רסטריקציה

אילוסטרציה לחיתוך אותו קטע של דנ"א בשלושה אנזימי רסטריקציה שונים. החיצים מסמנים את אתרי החיתוך. מיקומם השונה על הדנ"א מלמד שחיתוך באנזימים שונים מחלק את אותו קטע דנ"א למקטעים שונים.

4. שונות באוכלוסיה

נתאר לעצמנו לרגע שאחד האתרים של אנזים רסטריקציה נתון הוא אתר פולימורפי באוכלוסיה. כלומר, בחלק מן האוכלוסיה האתר קיים, ובחלק האחר אינו קיים. (עבר מוטציה אשר כתוצאה ממנה אינו מוכר עוד על ידי האנזים כאתר רסטריקציה).¹⁴ נוכל לגלות זאת ע"י חיתוך דנ"א מאנשים שונים באותו אנזים רסטריקציה וקבלת שתי קבוצות מקטעים שונות באוכלוסיה. (ציור 3). תופעה זו נקראת פולימורפיזם של אורך מקטעי רסטריקציה (RFLP) Restriction fragment length polymorphism.¹⁵ (ציור 3).

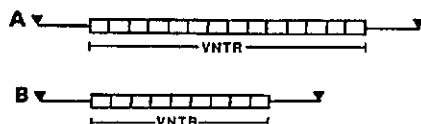
12. J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4
 13. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1
 14. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; J. Fowler, L. Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4; R. Lewin "DNA Fingerprints in Health and Disease" 233 *Science* (1986) 521
 15. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1



ציור 3: פולימורפיזם במקטעי חיתוך כתוצאה ממוטציה באתר החיתוך

בקטע הדנ"א המסומן B יש שלושה אתרי חיתוך המוכרים ע"י אנזים רסטריקציה מסוים. קטע דנ"א A דומה בכל לקטע B להוציא שני מוטציוני שחל בו באתר החיתוך האמצעי. כתוצאה ממוטציה זו האתר אינו מוכר יותר ע"י אנזים הרסטריקציה כאתר חיתוך. קטע דנ"א A יחתך לכן רק בשני מקומות ונקבל מקטע בגודל 12,000 בסיסים (12Kb). קטע דנ"א B יחתך בשלשה מקומות ונקבל שני מקטעים בני 7Kb ו-5Kb.

סיבה אחרת לקבלת מקטעי רסטריקציה שונים במגוון אורכים הרבה יותר גדול, קשורה לרצפים החוזרים. אנזים רסטריקציה, שאתרי חיתוך הדנ"א שלו נמצאים משני צידי הקטע בו מופיעים הרצפים החוזרים (VNTR) יחתוך את הקטע המכיל את הרצפים החוזרים בשלמותו. מאחר שקיים פולימורפיזם במספר החזרות של הרצפים, נקבל מקטעים בגדלים שונים באוכלוסייה.¹⁶ (ציור 4).



ציור 4: פולימורפיזם במקטעי חיתוך כתוצאה מהבדלים במספר הרצפים החוזרים

A ו-B הם קטעי דנ"א המצויים בפרט מסוים, כאשר A נמצא על כרומוזום מסוים ו-B על הכרומוזום המולוגי לו. A מכיל 19 רצפים חוזרים (VNTR) (מלבנים בציור) ו-B מכיל 9 רצפים חוזרים. משני צידי הרצפים החוזרים נמצאים גם ב-A וגם ב-B אתרי חיתוך (משולשים שחורים). חיתוך באתרים אלה יצור מקטעים שוני גדול כש-A ארוך מ-B.

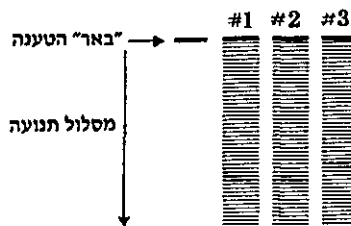
חשוב לציין, כי אנזים הרסטריקציה חותך לא רק באתרי החיתוך שמשני צידי המקטעים, בהם אנו מעוניינים, אלא גם בנקודות רבות אחרות בדנ"א, המהוות עבורו אתרי חיתוך. כך מתקבלת תערובת של מקטעי דנ"א רבים מאזורים שונים בדנ"א,

B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; J. Fowler, L. .16 . Burgoyne, A. Scott & H. Harding, *supra* note 4

המהווים למעשה רצף של גדלים, ¹⁷ החל ממקטעים קטנים בני עשרות בסיסים ועד לארוכים בני אלפי בסיסים. לאחר חיתוך הדנ"א בעזרת אנזים הרסטריקציה (תהליך האורך כ-20 שעות) יש צורך לסדר לפי ארכם את כל המקטעים המתקבלים, כבסיס למציאת המקטעים בהם אנו מעוניינים.

5. הפרדת המקטעים לפי גודלם

את תמיסת מקטעי הדנ"א ממקור מסויים, מכניסים לתוך "באר" (מעין גומה) בקצה משטח אפקי של חומר דמוי מיקפא (ג'ל). עם הפעלת זרם חשמל על הג'ל ינועו מקטעי הדנ"א, הטעונים שלילית, בשדה החשמלי שנוצר. המקטעים יצאו מה"באר" וינועו בתוך הג'ל לכיוון הקוטב החיובי, כאשר קטעים קצרים נעים מהר יותר מארוכים בגלל ההתנגדות הפחותה של הג'ל לתנועתם. בסיום התהליך, הנקרא אלקטרופורזה (electrophoresis), והנמשך כ-20 שעות, נקבל על הג'ל פיזור רציף של כל מקטעי הדנ"א, כשהם מסודרים לפי גודלם. הארוכים ביותר הם הקרובים ביותר ל"באר" והקצרים ביותר הם הרחוקים ביותר ממנה. ¹⁸ (ציור 5).



ציור 5: הרצת דנ"א חתוך של שלושה פרטים שונים

בחלק העליון של הציור נמצאות ה"בארות" בהן הוכנסו דוגמאות הדנ"א החתוך (1-3). הפסים במסלול התנועה באים לסמן את פיזור הדנ"א במסלול. רוחב המסלול נקבע על ידי גודל ה"באר". המסלול יכול מקטעים ארוכים בסמוך ל"באר" ומקטעים קצרים יותר ויותר ככל שמתרחקים ממנה.

6. העברת המקטעים מהג'ל לממברנת ניילון

לצורך המשך העבודה, מעבירים את כלל מקטעי הדנ"א באותה צורה בה הם ממוקמים על הג'ל לגליון ניילון, (בתהליך הנקרא Southern blotting). ¹⁹ בזמן ההעברה נפרדים

17. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1

18. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; J. Thornton, *supra* note 3

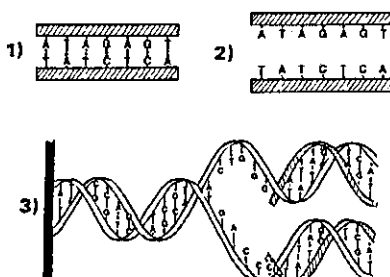
19. Procedures, *supra* note 11

מקטעי הדנ"א הדו-סרטי למקטעי דנ"א חד-סרטי.²⁰ הפרדה זו חשובה ביותר ומהווה תנאי הכרחי לזיהוי מקטעים פולימורפים בעזרת גלאים ידועים.

7. זיהוי המקטעים הפולימורפים בעזרת גלאי רדיואקטיבי

מתוך כלל המקטעים שהועברו מהג'ל לניילון אנו מעוניינים רק במקטעי הרצפים החוזרים הפולימורפים, כי בעזרתם נוכל להבדיל בין דנ"א ממקורות שונים. ראינו, שפולימורפיות המקטעים מתבטאת בהיותם בעלי אורך שונה בדנ"א ממקורות שונים. כן ראינו, שמקטעים בעלי אורך שונה נמצאים במרחקים שונים מנקודת ההתחלה של מסלול התנועה. מכאן, שבהשוואת מסלולי התנועה של דנ"א ממקורות שונים, ימצאו המקטעים הפולימורפים במרחקים שונים מנקודת ההתחלה. לא נותר לנו אלא לגלות את מקום המקטעים הפולימורפים במסלול התנועה בין כלל המקטעים המצויים בו. לשם כך אנו נעזרים בקטעי דנ"א בעלי הרכב בסיסים כזה המאפשר להם להתקשר אך ורק למקטעים הפולימורפים, ובכך להבדיל אותם משאר המקטעים במסלול התנועה. קטעי דנ"א אלו נקראים גלאים.

הגלאי (probe) הינו מקטע דנ"א דו-סרטי קצר (באורך של כמה אלפי בסיסים) בעל רצף בסיסים משלים (קומפלמנטרי) לרצף הבסיסים במקטעים אותם אנו מעוניינים לגלות. את הגלאי מסמנים בחומר רדיואקטיבי ומפרידים אותו לדנ"א חד-סרטי. כאשר מפגישים את הגלאי עם כלל מקטעי הדנ"א הנמצאים במצב חד-סרטי, הוא נקשר למקטעים המכילים רצפים משלימים לשלו, כשהליך הנקרא היברידיזציה (hybridization).²¹ (ציור 6).



ציור 6: היברידיזציה של גלאי למקטע דנ"א

1. הכנת גלאי בעל הרכב בסיסים ידוע. 2. פתיחת הדנ"א הדו-סרטי של הגלאי והפיכתו לדנ"א חד-סרטי. 3. הפגשת הדנ"א החד-סרטי של הגלאי עם מקטע דנ"א שנפתח גם הוא למצב חד-סרטי. הדנ"א החד-סרטי של הגלאי נקשר במקומות המתאימים לדנ"א החד-סרטי של המקטע.

20. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Bachtel, *supra* note 1; H. Logtenberg & E. Bakker "The DNA Fingerprint" 12 *Endeavour* (1988) 28

21. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Bachtel, *supra* note 1; Procedures, *supra* note 11

תהליך ההיברידיזציה נמשך כ-20 שעות. בסיומו, נשטפת ממברנת הניילון מעודף הגלאי הרדיואקטיבי, כך שהאזורים הרדיואקטיביים היחידים הנוותרים על הממברנה הם אלו שבהם נקשר הגלאי למקטעי הדנ"א.²² אלא, שאת האזורים הרדיואקטיביים לא ניתן לראות בעין ויש צורך לשם כך להשתמש בלוח צילום.

8. אוטורדיוגרפיה

את ממברנת הניילון מניחים על לוח צילום הרגיש לקרינה רדיואקטיבית. לאחר חשיפה במשך 1-5 ימים,²³ בהתאם לעצמת הקרינה ולרגישות לוח הצילום, מפתחים את לוח הצילום.²⁴ מתקבל משטח נקי, ועליו פסים שחורים (השיטה נקראת אוטורדיוגרפיה (autoradiography). פס שחור מתקבל בכל מקום בו הצטבר חומר רדיואקטיבי על ממברנת הניילון, כלומר בכל מקום בו נקשר הגלאי למקטע דנ"א. כך מסתמנים המקומות, אליהם הגיעו מקטעי הדנ"א הפולימורפים במהלך התנועה בשדה החשמלי, בהתאם לארכם.²⁵

9. ניתוח התוצאות

התוצאה הסופית של בדיקת דוגמת דנ"א היא אוסף פסים על לוח צילום. מספר הפסים המתקבלים בכל טור נע בין אחד לכמה עשרות, ותלוי בגלאי בו השתמשנו ובתנאים בהם בוצעו ההיברידיזציה והשטיפות מעודף הגלאי. אוסף הפסים בטור בהתאם למספרם ומקומם נקרא פרופיל הדנ"א של הדוגמא.

(א) הנישה של גלאי לאתר יחיד (Single locus probe)

בגישה זו משתמשים בגלאי יחודי לכל הרכב של רצף שחזור (VNTR).²⁶ אם יהיה ברצוננו לבחון רצפים חוזרים בעלי הרכב אחר, יהיה עלינו להשתמש בגלאי יחודי אחר. ההיברידיזציה והשטיפות נעשות בתנאים המאפשרים קשירת הגלאי רק למקטעים שיש לו התאמה מלאה עמם. (תנאים של צמידות גבוהה (high stringency).²⁷ כל רצף חוזר בדנ"א מופיע פעמיים. פעם על כרומוזום מסוים ופעם על הכרומוזום ההומולוגי לו. לכן, יופיעו על לוח הצלום, כתוצאה משימוש בגלאי יחודי, שני פסים בכל טור, אם אורך ה- VNTR בכל אחד מהכרומוזומים שונה, או פס אחד, אם ארכם זהה.²⁸

. ibid .22

. ibid .23

. Procedures, supra note 11 .24

. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, supra note 1 .25

. ibid .26

B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, supra note 1; Procedures, supra note 11 .27

. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, supra note 1 .28

מאחר שקיים פולימורפיזם באוכלוסיה לגבי אורך הרצפים החוזרים נקבל בפרטים שונים זוגות פסים במקומות שונים. אם נמנה את כל הפסים השונים המתקבלים מפרטים שונים באוכלוסיה, לאחר שמוש בגלאי יחודי, יגיע מספרם לעשרות רבות.²⁹ (ציור 7). הופעה של יותר משני פסים לטור מעלה אפשרות שבדוגמא היה חומר השייך ליותר מאדם אחד.³⁰ (ציור 7).



ציור 7: פרופיל דנ"א המתקבל מגלאי לאתר יחיד

קישור בתנאי צמידות גבוהה בין גלאי רדיואקטיבי לדנ"א ממקורות שונים. בכל מקום שהגלאי נקשר לדנ"א התקבל פס שחור על לוח הצלום. מאנשים שונים מתקבלים זוגות פסים או פס בודד במקומות שונים. (הערה 1).

(ב) הנישה של גלאי לאתרים רבים (Multi locus probe)

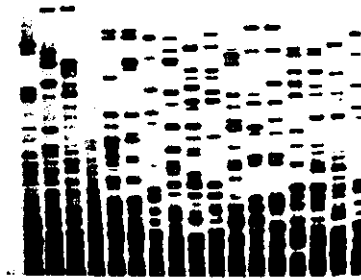
בגישה זו אפשר בעזרת גלאי אחד לאתר בו זמנית מספר רב של אזורים פולימורפים בדנ"א, חלקם בעלי רצפים תואמים לאלו שבגלאי, ואחרים, בעלי רצפים דומים בלבד. כאן מבצעים את ההיברידיזציה והשטיפות כתנאים המאפשרים התקשרות הגלאי לדנ"א גם כאשר אין ביניהם התאמה מלאה (תנאים של צמידות נמוכה (low stringency)).³¹ על לוח הצילום יופיעו במקרה זה כמה עשרות פסים לטור, חלקם חזקים וחלקם חלשים. עצמת הפסים משקפת את מידת ההתאמה בין הרצפים והגלאי.³² (ציור 8).

29. K. Monson "Semiautomated Analysis of DNA Autoradiograms" 15 *Crime Lab. Digest* (1988) 104; B. Budowle & K. Monson "A Statistical Approach for VNTR Analysis" (Forensic Science Research and Training Center, FBI Academy, Quantico, Virginia, USA); E. Lander "DNA Fingerprinting on Trial" 339 *Nature* (1989) 501; A. Jeffreys, V. Wilson, R. Neumann & J. Keyte "Amplification of Human Minisatellites by the Polymerase Chain Reaction: Towards DNA Fingerprinting of Single Cells" 16 *Nucleic Acids Res.* (1988) 10953

30. F. Baechtel, *supra* note 2

31. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1

32. *ibid.*



ציור 8: פרופיל דנ"א המתקבל מגלאי לאתרים רבים

קישור בתנאי צמידות נמוכה בין גלאי רדיואקטיבי לדנ"א ממקורות שונים. בכל מקום שהגלאי נקשר לדנ"א התקבל פס שחור על לוח הצלום. מאנשים שונים מקבלים פיזור שונה של פסים לאורך מסלול התנועה. (הערה 1).

מספר הפסים הרב מקטין את הסיכוי ששני פרטים שונים יתנו אוסף פסים זהה לגמרי, ובדרך כלל די בגלאי אחד כזה כדי ליחד כל פרט. עם זאת, רבוי הפסים מקשה לפעמים לתת קביעה חיובית גם כאשר שתי דוגמאות דנ"א באות מאותו המקור.³³ שיטה זו היא הצורה המקורית של "טביעת האצבעות של דנ"א" שפותחה למטרות פורנויות ע"ד אלק ג'פריז במעבדתו שבאנגליה בשנת 1985.³⁴

10. עיבוד התוצאות

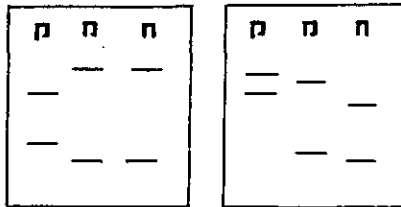
עיבוד התוצאות של פרופיל דנ"א, המכיל שני פסים בלבד, קל יותר וברור יותר ביחס לפרופיל המתקבל מגלאי לאתרים רבים.³⁵ כמו כן הוא בעל יתרונות משיקולים גנטיים, שיתוארו בהמשך.

רצוי להשוות בין דוגמאות דנ"א שנבדקו במקביל על אותו ג'ל, אך ניתן גם להשוות בין דוגמאות דנ"א שנבדקו במועדים שונים, אם התנאים בהם כוצעו הבדיקות היו זהים ככל האפשר בכל המקרים. לעיתים, כבר בהסתכלות ראשונית, בולט ההבדל בין הפרופילים המתקבלים מדוגמאות הדנ"א שנבדקו, ואז ניתן לקבוע כי לפנינו דנ"א ממקורות שונים. (ציור 9).

33. *ibid.*

34. A. Jeffreys, *supra* note 8; P. Gill, A. Jeffreys & D. Werrett "Forensic Application of DNA Fingerprints" 318 *Nature* (1985) 577.

35. K. Zang & N. Blin, *supra* note 3; B. Budowle "The RFLP Technique" 15 *Crime Lab. Digest* (1988) 97.



ציור 9: בדיקת דנ"א כמוצג

באילוסטרציה זו, השוואת פרופיל דנ"א מקרבן (ק), מוצג (מ) וחשוד (ח). בשני הלוחות אין התאמה בין פרופיל הדנ"א מהמוצג ומהקרבן, כך שהקרבן אינו המקור לדנ"א שנמצא במוצג. בלוח הימני אין התאמה גם בין פרופיל הדנ"א מהחשוד ומהמוצג כך שגם החשוד אינו המקור לדנ"א שנמצא במוצג. בלוח השמאלי יש התאמה בין פרופיל הדנ"א מהמוצג ומהחשוד ולכן החשוד בא בחשבון כמקור לדנ"א מהמוצג.

כאשר נראה שהפרופיל בשתי דוגמאות דנ"א הוא דומה, יש לבצע אנליזה מדויקת יותר, לעיתים באמצעות תכנית מחשב. האנליזה כוללת חישוב ההסתברות הסטטיסטית להופעת כל אחד מהפסים באוטורדיוגרם באוכלוסיה הרלוונטית, והסתברות הופעת הפרופיל השלם עבור גלאי אחד או מספר גלאים.³⁶

11. הי PCR ושימושי

לאחרונה פותחה שיטה המאפשרת שכפול במבחנה של קטעי דנ"א מוגדרים. שיטה זו נקראת Polymerase chain reaction (PCR) ומאפשרת הכנת כמות גדולה של מקטע דנ"א מסויים מכמות מזערית של דנ"א. שכפול הדנ"א מתבצע בעזרת מכשיר אוטומטי ממוחשב, בשלשה שלבים החוזרים על עצמם כמה עשרות פעמים, כך שבסיום כל מחזור מוכפלת כמות הדנ"א שבתחילתו. לאחר 20-30 מחזורים יתקבלו כ- 10^9 עותקים של קטע הדנ"א המשוכפל.³⁷ זיהוי בעזרת דנ"א ששוכפל בשיטת הי PCR שונה מהשיטה שתוארה עד כה ונעשה בשתי גישות אפשריות:

א. הכפלה של קטע הכולל רצפים חוזרים (VNTR)³⁸ עד לקבלת כמות כה גדולה ממנו

36. P. Neufeld & N. Colman "When Science Takes the Witness Stand" 262 *Scientific American* (1990) 18.

37. J. Thornton, *supra* note 3; K. Mullis "The Unusual Origin of the Polymerase Chain Reaction" 262 *Scientific American* (1990) 36; J. Marx "Multiplying Genes by Leaps and Bounds" 240 *Science* (1988) 1408.

38. A. Jeffreys, V. Wilson, R. Neumann & J. Keyte, *supra* note 29; G. Horn, B. Richards & K. Klinger "Amplification of a Highly Polymorphic VNTR Segment by the Polymerase Chain Reaction" 17 *Nucleic Acids Res.* (1989) 2140.

שניתן לגלות אותה באנליזה מהירה על ג'ל. במקרה זה אין צורך בתהליכי החיתוך וההיברידיזציה עם הגלאי. כיום, גודל המקטע אותו ניתן לשכפל היטב מוגבל לכ־2000 בסיסים.³⁹ האפשרות לשוונות במספר הרצפים החוזרים במקטע כגודל זה אינה רבה, ולכן מידת הפולימורפיות בשיטה זו פחותה בהשוואה לאפיון דנ"א בשיטה שתוארה קודם לכן.

ב. הכפלת מקטעים אשר ידוע שהם נבדלים באוכלוסיה בבסיס אחד או במספר בסיסים ולכל אחד מהם גלאי מתאים. לאחר השכפול, בודקים את תגובת הגלאי למקטעים המשוכפלים, ובודקים עם אלו מן הגלאים היתה התקשרות. אצל אנשים שונים תהיה התקשרות עם גלאים שונים. בדוגמאות דנ"א מאותו מקור תהיה התקשרות עם אותם גלאים.⁴⁰

תרומת שיטת ה־ PCR לאנליזות של דנ"א היא: 1. במקרים בהם כמות החומר הביולוגי במוצג אינה מספיקה לבדיקה המקובלת, כגון שיערה אחת,⁴¹ או תא זרע אחד;⁴² 2. במקרים בהם איכות הדנ"א במוצג ירודה והוא נמצא כבר בתהליך פירוק חלקי, כתוצאה מהשפעת תנאי הסביבה.⁴³ בשני המקרים, השמוש בטכניקת ה־ PCR יאפשר הכפלה סלקטיבית של הקטעים שנבחרו לצורך הבדיקה.

ד. יתרונות בדיקת הדנ"א

1. כושר הפרדה גבוה מאוד

השיטות הביוכימיות והסרולוגיות המקובלות מבדילות פרט באוכלוסיה ברמה של אחד למאה עד אחד ל־10,000 אנשים.⁴⁴ באנליזות הדנ"א, לאחר שמוש במספר מתאים של גלאים ניתן להגיע להפרדה ברמה של אחד למליון ואף למעלה מזה.⁴⁵ הסיבה היא שרמת הפולימורפיות במקטעי הדנ"א הנבדקים גבוהה הרבה יותר מרמת הפולימורפיות

39. A. Jeffreys, V. Wilson, R. Neumann & J. Keyte, *supra* note 29.

40. R. Saiki, P. Walsh, C. Levenson & H. Erlich "Genetic Analysis of Amplified DNA With Immobilized Sequence-Specific Oligonucleotide Probes" 86 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (1989) 6230; K. Comey "The Use of DNA Amplification in the Analysis of Forensic Evidence" 15 *Crime Lab. Digest* (1988) 99.

41. R. Higuchi, C. Beroldingen, G. Sensabaugh & H. Erlich "DNA Typing From Single Hairs" 332 *Nature* (1988) 543.

42. H. Li, U. Gyllensten, X. Cui, R. Saiki, H. Erlich & N. Arnheim "Amplification and Analysis of DNA Sequences in Single Human Sperm and Diploid Cells" 335 *Nature* (1988) 414.

43. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; J. Thornton, *supra* note 3; J. Marx, *supra* note 37.

44. J. Thornton, *supra* note 3.

45. *ibid*.

בחלבונים או בקבוצות הסוכריות הנבדקות בשיטות הביוכימיות והסרולוגיות. רק בין תאומים זהים לא ניתן להפריד בשיטה זו.⁴⁶

2. עמידות לתנאי סביבה

דנ"א הוא חומר היכול להשמר בתנאים קשים למשך זמן רב ביותר. דוגמאות דם זורע יבשות יכולות להשמר אף מספר שנים.⁴⁷ הסיבה לכך היא שבדנ"א הבדיקה תלויה כמבנה היסודי של המולקולה, (רצף הבסיסים), שהוא מאוד יציב ועמיד לתנאי סביבה שונים. לעומת זאת הבדיקות הביוכימיות תלויות בפעילות הביולוגית של החלבון, וזו רגישה לתנאי הסביבה ונחלשת עם הזמן.⁴⁸

3. זיהוי תערובות דנ"א ממקורות שונים

בגישה של גלאי לאתר יחיד קל לאתר תערובות של דנ"א משני מקורות שונים (או יותר).⁴⁹ יש לכך חשיבות רבה במקרה של ערוב דמים על מוצג או ערוב של הפרשות וגינליות עם זרע במוצגים הקשורים בעבירות מין.

4. קשירת חשוד לסדרת פשעים

בחקירה של סדרת פשעים דומים, כגון מספר עבירות מין שבוצעו בשיטה דומה, ניתן בעזרת אנליזת דנ"א מזרע שנמצא על המתלוננת או בזירת העבירה לקבוע אילו מן העבירות בוצעו על ידי אותו חשוד.⁵⁰

5. יעילות רבה בבדיקת זרע

א. מתוך כ־10 השיטות הביוכימיות והסרולוגיות המקובלות לבדיקת דם רק שתיים או שלש מתאימות גם לבדיקות זרע. משום כך כושר ההפרדה באפיון כתמי זרע בשיטות המקובלות נמוך מזה של כתמי דם.⁵¹ בדיקת אפיון באמצעות דנ"א מתאימה באותה מידה הן לדם והן לזרע, והיא, כאמור, בעלת כושר הפרדה גבוה ביותר.

ב. בבדיקת דנ"א קיימות שיטות המאפשרות הפרדת הדנ"א שמקורו בזרע מהדנ"א של האשה כאשר יש ערבוב של תאי זרע עם תאים וגינליים, או עם דם האשה, ואפיון כל אחד מהם לחוד.⁵²

46. B. Gaudette "DNA Typing - A New Service to Canadian Police" 52 *RCMP Gazette* 1 (1990).

47. P. Gill, A. Jeffrey & D. Werrett, *supra* note 34.

48. B. Gaudette, *supra* note 46.

49. *ibid*.

50. *ibid*.

51. H. Logtenberg & E. Bakker, *supra* note 20.

52. Procedures, *supra* note 11. D. Werrett & J. Lygo, *Personal Communication*.

ג. בבדיקת דנ"א, ניתן ע"י שימוש בגלאי לאתר יחיד לזהות אם המוצג מכיל תערובת דנ"א של כמה אנשים, ולקבוע את מספרם ואת אפיונם, מאחר שכל פרט מאופיין ע"י שני פסים לכל היותר. ליתרון זה חשיבות רבה במקרים של אונס קבוצתי.⁵³

6. העזרות בריבוי הדנ"א (PCR)

כאשר החומר לבדיקה במוצג הוא מועט, אפשר בעזרת PCR להרבות קטעים רצויים בדנ"א לצורך הבדיקה. עקרונית ניתן לעשות זאת מתאים מועטים, כגון משרש שיערה או מתא זרע.⁵⁴ אפשרות הריבוי של החומר לבדיקה קיימת לגבי דנ"א, ולא לגבי חלבון או קבוצות סוכריות.

7. מגוון רקמות גדול

מאחר שהדנ"א משותף לכל התאים בגוף, ניתן לקבל אותו פרופיל דנ"א מרקמות שונות כדם, זרע, תאי אפיתל הרוק, ותאי שרש שיערה.⁵⁵ אפשר, לכן, לקחת מאדם דוגמת שיער⁵⁶ או דוגמת רוק,⁵⁷ המיצגת את פרופיל הדנ"א שלו, כתחליף באותם מקרים של סרוב לתת דוגמת דם. אפשרות כזו אינה קימת לגבי מערכת הבדיקות הביוכימיות – סרולוגיות.

8. זיהוי מין (Sex) בעל הדנ"א הנבדק

בדנ"א, המתקבל ממוצגים, ניתן לקבוע את מינו של המקור לדנ"א זה. הבדיקה נעשית בעזרת גלאים מתאימים, היחודיים לכרומוזום Y, הנמצא רק בזכר ולא בנקבה.⁵⁸

53. B. Gaudette, *supra* note 46.

54. A. Jeffreys, V. Wilson, R. Neumann & J. Keyte, *supra* note 29; K. Comey, *supra* note 40; R. Higuchi, C. Beroldingen, G. Sensabaugh & H. Erlich, *supra* note 41; H.

Li, U. Gyllensten, X. Cui, R. Saiki, H. Erlich & N. Arnheim, *supra* note 42.

55. B. Gaudette, *supra* note 46.

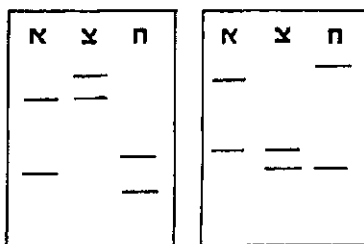
56. B. Merz "DNA Fingerprints Come to Court" 259 JAMA (1988) 2193.

57. A. Jeffreys, V. Wilson, R. Neumann & J. Keyte, *supra* note 29; D. Werrett "Semen and Saliva 1984 Onwards, a Brief Synopsis" *Eight Interpol (ICPO) Forensic Science Symposium* (1986).

58. Y. Nakahori, K. Mitani, M. Yamada & Y. Nakagome "A Human Y-Chromosome Specific Repeated DNA Family (DYZ1) Consists of a Tandem Array of Pentanucleotides" 14 *Nucleic Acids Res.* (1986) 7569; C. Bishop, G. Guellaen, D. Geldwerth, R. Voss, M. Fellous & J. Weissenbach "Single-Copy DNA Sequences . Specific for the Human Y Chromosome" 303 *Nature* (1983) 831.

9. אבהות

שיטת אנליות הדנ"א יכולה לשמש גם לקביעת אבהות.⁵⁹ מאחר שהפסים המתקבלים באמצעות הגלאי עוברים בתורשה מההורים לצאצאים, חייב כל צאצא לשאת שני פסים, האחד תרומת אביו והשני תרומת אמו. אם לא מתקיים תנאי זה התשובה לבדיקת האבהות תהיה שלילית. (ציור 10).



ציור 10: בדיקת דנ"א כמקרה אבהות

באילוסטרציה זו ניתן פרופיל דנ"א של האם (א), של החשוד כאב (ח) ושל הצאצא (צ). בלוח הימני הצאצא מכיל פס אחד שמקורו באם ואחד שמקורו עשוי להיות בחשוד כאב. בלוח השמאלי החשוד כאב אינו יכול להיות אביו הביולוגי של הילד.

בדומה לכך, אפשר לעשות אנליזה לחומר החשוד כשייך לגנדר או חלל, ולזהות אותו לפי דוגמאות ידועות של הוריו או ילדיו.⁶⁰

10. דנ"א שאינו מאדם

אין סכנה שזיהום ע"י דנ"א שאינו ממקור אנושי (כגון: חידקים) ישבש את האנליזה, מאחר שכל הגלאים לאתר יחיד יחודיים לרצף הבסיסים בדנ"א האנושי.⁶¹

59. A. Jeffreys, J. Brookfield & R. Semeonoff "Positive Identification of an Immigration Test-Case Using Human DNA Fingerprints" 317 *Nature* (1985) 818; P. Helminen, C. Ehnholm, M. Lokki, A. Jeffreys & L. Peltonen "Application of DNA Fingerprints to Paternity Determination" i *Lancet*, (1988) 574

60. B. Gaudette, *supra*, note 46

61. P. Gill, J. Lygo, S. Fowler & D. Werrett "An Evaluation of DNA Fingerprinting for Forensic Purposes" 8 *Electrophoresis* (1987) 38; R. Howlett "DNA Forensics and the FBI" 341 *Nature* (1989) 182; D. Adams "Validation of the FBI Procedure for DNA Analysis: A Summary" 15 *Crime Lab. Digest* (1988) 106

ה. מגבלות בדיקת הדנ"א וגישות לפתרון בעיות

1. גודל הכתם

לביצוע בדיקת דנ"א (ללא שמוש ב-PCR) דרושה כמות דנ"א גדולה יחסית. במקרה של כתם דם, דרוש כתם גדול יותר מזה הנדרש לבדיקות סרולוגיות. בורע כמות החומר הנדרשת קטנה יותר מאשר בדם.

2. משך התהליך

אנליזה בעזרת דנ"א היא תהליך ארוך. בדיקה שלמה, הכוללת אנליזה בעזרת מספר גלאים, עשויה להמשך מספר שבועות. נעשים מאמצים לקיצור השלבים הארוכים. פיתוח שיטת ה-PCR, למשל, יקצר אף הוא את התהליך.

3. פסים נוספים

כאמור, בתנאי הבדיקה הרגילים, בגלאי לאתר יחיד, צפויים שני פסים מכל פרט. למרות זאת נצפים, לפעמים, בלוח הצילום פסים נוספים. ניתן בקלות יחסית לקבוע מתי פסים אלו אינם רלוונטים. עצמת הפס בלוח הצילום תלויה בגדלם ובכמותם של מקטעי הדנ"א, אליהם נקשר הגלאי, מאחר שפרמטרים אלו קובעים את מספר מולקולות הגלאי שיכולות להתקשר אליו.⁶² ההנחה היא, שהפסים הרלוונטים יופיעו כהים יותר. פסים בהירים מופיעים בדרך כלל בתחום המקטעים הגדולים יותר, שכן מקורם בחיתוך לא מלא של הדנ"א ע"י אנזים הרסטריקציה. חיתוך לא מלא יכול לנבוע מכך שהמוצג מלוכלך מאוד או כאשר היה חשוף לתנאים קשים במיוחד. הדנ"א שלא נחתך בכל אתרי החיתוך האפשריים יהיה כמובן גדול יותר, אך עדין יכיל בתוכו את המקטע הפולימורפי. לכן, יעבור היברידיזציה עם הגלאי, ויפיע על לוח הצילום. עצמתו תהיה נמוכה יותר בגלל כמותו הקטנה יותר.

חשיפה ממושכת מאוד של ממברנת הניילון ללוח הצילום יכולה לגלות פסים חלשים נוספים, שמקורם בהברידיזציה חלשה מאוד של הגלאי לאתרים בדנ"א בעלי התאמה חלקית לגלאי.⁶³

4. תזוזת פסים (band shifting)

הקביעה אם שתי דוגמאות דנ"א שייכות לאותו מקור, כגון שתי דוגמאות משני מוצגים שונים או דוגמא ממוצג ודוגמא מחשוד או מתלונן, מתבססת על הסתכלות

62. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; B. Merz, *supra* note 56.

63. Z. Wong, V. Wilson, I. Patel, S. Povey & A. Jeffreys "Characterization of a Panel of Highly Variable Minisatellites Cloned From Human DNA" 51 *Ann. Hum. Genet.* (1987) 269.

בפסים המופיעים על לוח הצילום. אם הפסים של דוגמא אחת נמצאים במקומות שונים ביחס לדוגמא שניה רואים את שתי הדוגמאות כבאות משני מקורות שונים. אם הפסים של דוגמא אחת מקבילים לפסים של דוגמא שניה ניתן לראות את שתיהן כבאות מאותו מקור.

בהשוואת דנ"א של מוצג עם דנ"א מדוגמת דם של אותו מקור נמצא לעיתים שיש סטייה בין שניהם. תופעה זו עלולה לנבוע מחמרים הקיימים בכתם, ואשר בתהליך המיצוי של הדנ"א מתלויים אליו וגורמים לשינוי בנדידתו על הג'ל.⁶⁴ אם הסיבה לתזוזת הפסים היא בחמרים שהתמצו מהמוצג לתמיסת הדנ"א ניתן יהיה להוסיף אליה מקטעי דנ"א באורכים שונים וידועים, בהנחה שהחמרים שהשפיעו על מהירות נדידתו של הדנ"א בתמיסה ישפיעו גם על נדידתם של מקטעים אלו. כך אפשר יהיה למדוד את התזוזה ולתקנה בהתאם. אם תזוזת הפסים נובעת מחמרים שנקשרו לדנ"א הנבדק עצמו ניתן להשתמש בגלאים לאתרים מונומורפים.⁶⁵ אלו הם אתרים שעל ידי חיתוכם יוצרים מקטעים בעלי גודל שווה בכל הפרטים באוכלוסיה, ולכן הם צריכים להיות מקבילים בכל מסלולי התנועה. בכל מסלול, שבו תתגלה תזוזה בפסים אלה, ניתן יהיה להעריך על פיה את תזוזת שאר הפסים באותו המסלול. לאחר חישוב מתקן של התזוזה נוכל להעריך אם אי מקבילות הפסים מקורה בתזוזה או בהבדל גנטי בהרכב הדנ"א.⁶⁶

5. דנ"א מפורק

נוכחות חידקים או חמרים אורגניים בדוגמת הדנ"א עלולה לגרום לפירוקו למקטעים שונים. כתוצאה מכך יש אפשרות שנאבד פס השייך לאיזור המקטעים הגדולים וניותר עם פס אחד בלבד באיזור המקטעים הקצרים יותר, או שלא נקבל פרופיל דנ"א כלל.⁶⁷ אין אפשרות שהתנאים שגרמו לפירוק הדנ"א יגרמו לשינוי בתוך רצף הדנ"א.⁶⁸ או שתתקבל תוצאה חיובית מטעה (false positive).⁶⁹

6. רציפות הפסים ותדירות הופעתם

בניגוד לבדיקות הסרולוגיות המקובלות, בהן מספר הוריאציות באוכלוסיה מוגדר וידוע, יכול מספר הוריאציות של קטעי דנ"א פולימורפים באוכלוסיה להגיע לעשרות רבות.⁷⁰ אך בשיטה הנוכחית, המבוססת על רצפים חוזרים (VNTR), אין אפשרות

64. P. Neufeld & N. Colman, *supra* note 36.

65. E. Lander, *supra* note 29; P. Neufeld & N. Colman, *supra* note 36.

66. P. Neufeld & N. Colman, *supra* note 36.

67. *ibid*.

68. R. Howlett, *supra* note 61.

69. "Whose Finger on the DNA?" 122 *New Scientist* (1989) 25.

70. K. Monson; B. Budowle & K. Monson; E. Lander; A. Jeffreys, V. Wilson, R.

. Neumann & J. Keyte, *supra* note 29

להבחין בין מקטעים, הנבדלים ביניהם ביחידה חוזרת אחת, במיוחד כאשר המקטע גדול והיחידה החוזרת קצרה.

במקרים, בהם אין אפשרות לשלול קשר של חשוד לעבירה על סמך אנליזת דנ"א, יש צורך בהערכה סטטיסטית, שתתלווה לפרופיל הדנ"א ותצביע על החלק היחסי באוכלוסיה היכול להיות תורם פוטנציאלי לדנ"א הנבדק ממוצג.

במעבדת ה-FBI פתחו גישה סטטיסטית על סמך מדגם המכיל כמה מאות פרטים.⁷¹ לפי שיטה זו מחלקים את הפסים מאוכלוסית המדגם לקבוצות גודל. המספר הכולל של פסים מאוכלוסית המדגם, השייכים לקבוצת גודל מסוימת, ישמש לחישוב תדירות הופעת פס כלשהו בקבוצה זו.⁷² לדוגמא: מתוך 400 פסים שהתקבלו מ-200 פרטים באוכלוסית המדגם, 50 פסים נפלו בתחום קבוצת גודל מסוימת, לכן פס שיתקבל ממוצג ושייך לקבוצת גודל זו, אופיני ל-50/400 או 1/8 מכלל האוכלוסיה. הסתברות הופעת דגם שני פסים מסויים, תחושב לפי משוואת הרדי-וינברג (Hardy-Weinberg), כלומר מכפלת הסתברויות סיכויי ההופעה של כל אחד משני הפסים (P, Q) במספר שניים, שהוא מספר הקומבינציות שלהם (2 P Q).⁷³

7. אמינות הבדיקה

בדיקות דנ"א נערכות כיום במעבדות ממשלתיות ובחברות פרטיות.⁷⁴ העקרונות, עליהם מתבססת שיטת הזיהוי באמצעות אנליזת דנ"א, נמצאים גם ביסוד השיטות המקובלות במחקרים גנטיים, במחקרים על רגישות ונטיה למחלות תורשתיות ובמחקרים של נדידת אוכלוסיות הומניות ושל בעלי-חיים.

דעתנו היא, כי הדגש בקביעת האמינות של זיהוי פלילי בעזרת אנליזת דנ"א צריך להיות במישור הטכני בשאלת המיומנות של בדיקת דנ"א מכתמים של נזולי גוף המתקבלים בתנאים לא מבוקרים.⁷⁵ בבדיקת אמינות שנעשתה באנגליה נמצאו אותן תוצאות בבדיקות שבוצעו במעבדות שונות לאותן דוגמאות דנ"א.⁷⁶ כן נמצא כי פרופיל דנ"א, המתקבל מכתמי דם של אותו הפרט שהוחזקו בתנאים שונים ובמשכי זמן שונים, היה זהה.⁷⁷

71. B. Budowle & K. Monson, *supra* note 29.

72. B. Budowle & K. Monson, *supra* note 29; R. Howlett, *supra* note 61.

73. B. Budowle & K. Monson, *supra* note 29.

74. P. Newmark "DNA Fingerprints Go Commercial" 321 *Nature* (1986) 104; P. Newmark "DNA Fingerprinting at a Price at ICI's UK Laboratory" 327 *Nature* (1987) 548; M. Barinaga "DNA Fingerprinting Database to Finger Criminals" 331 *Nature* (1988) 203.

75. B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1; J. Long "Admissibility of DNA Test Results as Forensic Evidence Debated" October 17 *Chemical & Engineering News* (1988) 19.

76. J. Lygo, E. Rutter & D. Werrett, *Personal Communication*.

77. D. Adams, *supra* note 61.

כדי להבטיח שהאנליזות תיעשנה כתנאים זהים בכל בדיקה, מצרפים לבדיקה: סמני גודל המאפשרים חישוב ארכי המקטעים,⁷⁸ דוגמת דנ"א ממקור קבוע, שפרופיל הדנ"א שלה ידוע, המשמשת כביקורת לאיכות הבדיקה⁷⁹ וסמנים לזיהוי תזוזת הפסים.⁸⁰ בעיה נוספת של חוסר אחידות בתנאי הבדיקה נובעת מכך, שהארצות המבצעות בדיקת פרופיל דנ"א אינן משתמשות כולן באותו אנזים רסטריקציה לחיתוך הדנ"א. מאחר שכל אנזים רסטריקציה תותך אחרת את הדנ"א, לא ניתן להשוות תוצאות בדיקות הנערכות בארצות שונות אם השתמשו באנזימי רסטריקציה שונים.⁸¹ הגלאים שבשימוש גם הם רבים, כאשר ארה"ב וקנדה משתמשות כאותם הגלאים, ואילו מעבדות באנגליה ובארצות אירופאיות אחרות משתמשות בגלאים אחרים.⁸² לא ניתן להשוות תוצאות בדיקות הנערכות בארצות שונות אם השתמשו בגלאים שונים. אפשר להשוות תוצאות בין מעבדות שונות רק אם הן השתמשו באותו אנזים רסטריקציה, באותו גלאי ובתנאי בדיקה דומים ככל האפשר.

ברוב מדינות העולם משתמשים למטרות פורנזיות בגלאים לאתר יחיד, הנותן לכל היותר שני פסים בפרופיל הדנ"א. הפסים בדרך כלל ברורים ומופרדים היטב זה מזה – דבר המקל על המדידה, ניתוח התוצאות והצגתן.⁸³ בשימוש בגלאי לאתרים רבים מתקבלים פסים צפופים מאוד ושונים בעצמתם, בגלל מידת ההתאמה השונה של הגלאי אליהם.⁸⁴ השוואת שתי דוגמאות תהיה קשה, ביחוד אם הן מכילות כמויות דנ"א שונות, מאחר שיתכן שפסים חלשים המופיעים בפרופיל הדנ"א של הדוגמא בעלת כמות הדנ"א הגדולה יותר, לא יופיעו בדוגמא בעלת כמות הדנ"א הקטנה יותר.⁸⁵ מדינות אירופה, המבצעות אנליזה של דנ"א, מתארגנות לצורך קביעת סטנדרטיזציה של השיטה לגבי השימוש באנזים רסטריקציה, בגלאים, בסמני גודל, בביקורות ובתנאי מהלך העבודה.⁸⁶ המדינות משוות ביניהן אנליזות ממעבדות שונות לבחינת מהימנות העבודה והתוצאה, וזאת כדי שניתן יהיה להגיע למצב, בו יוכלו במדינה אחת להשתמש בנתונים לגבי פרופיל הדנ"א של פרט מסויים, שהתקבלו במדינה אחרת.⁸⁷

.78 B. Budowle & K. Monson, *supra* note 29.

.79 Procedures, *supra* note 11.

.80 E. Lander, *supra* note 29.

.81 S. Watts "Search Continues for European Standard on DNA Probes" 123 *New Scientist* (1989) 22.

.82 R. Lewin "DNA Typing on the Witness Stand" 244 *Science* (1989) 1033.

.83 R. Howlett, *supra* note 61; B. Budowle, *supra* note 35.

.84 B. Budowle, H. Deadman, R. Murch & F. Baechtel, *supra* note 1.

.85 *ibid*.

.86 "DNA Fingerprinting and Related Techniques in Forensic Science" 6 *BE* (1989) 12;

. S. Watts, *supra* note 81

.87 S. Watts, *supra* note 81.

בארה"ב הקים ה-FBI ועדה מיוחדת, שתפקידה להביא לסטנדרטיזציה של השיטה במדינות השונות בארה"ב ולקביעת נהלים לביקורת איכות שתתבצע בכל בדיקה.⁸⁸ מטרת הסטנדרטיזציה היא לאפשר מחשוב כל התוצאות מכל המעבדות ופתיחת "בנק מידע" כלל ארצי אליו יתרמו וממנו ישאבו אינפורמציה המעבדות השונות בכל רחבי ארה"ב.⁸⁹ האקדמיה הלאומית למדעים שבארה"ב מרכזת את כלל הנושאים הקשורים בכעיות טכניות, משפטיות ואתיות של שימוש בבדיקת דנ"א למטרות פורנויות.⁹⁰ במדינת ניו-יורק הוקמה ועדה שתפקידה יהיה לווסת את השימוש בבדיקת דנ"א למטרות פורנויות, על ידי כך שגוף מדעי יבדוק את דיוק התוצאות לפני שיובאו לבית המשפט, וכמו כן יבקר את כל הגופים הפרטיים המבצעים בדיקות דנ"א.⁹¹ דרישה להקמת ועדות כאלה קמה לאחר ששתי בדיקות שבצעה אחת החברות הפרטיות נדחו על ידי בית המשפט, מאחר שלא השתמשו בביקורות כנדרש.⁹² בעקבות מקרים אלו קבע משרד הטכנולוגיה של הקונגרס (O.T.A.), שבדיקת הדנ"א תקפה ואמינה, כאשר היא מבוצעת כראוי ומנותחת על ידי צוות מיומן.⁹³

8. שימוש בבדיקה כארץ

משטרת ישראל, באמצעות המעבדה לכיולוגיה פורנוית במוז"פ, בוחנת את הנהלים השונים הקיימים בצפון אמריקה ובאירופה על מנת להקים בארץ מערכת עצמאית לבדיקת דנ"א במוצגים.

הניסויים, שערכנו עד כה, מבטיחים מאוד, ולא רחוק היום בו נוכל לספק למערכת המשפט שירות בנושא זה, כמעבדות המתקדמות בצפון אמריקה ואירופה.

1. דוגמאות לשימוש בבדיקת הדנ"א

עם התבססות השיטה בצפון אמריקה ואירופה, רבים הם המשפטים, בהם כבר מוגש פרופיל הדנ"א כראיה לבית המשפט, במקרים של רצח, אונס ובירור אבהות. אין בכונתנו לכלול במסגרת מאמר זה סקירה מקיפה של אותם משפטים, אך נראה לנו שיש מקום להגיש מספר דוגמאות, המצביעות על תרומתו של הזיהוי באמצעות דנ"א למערך החקירה והמשפט.

88. A. Anderson "Judge Backs Technique" 340 *Nature* (1989) 582; S. Watts, *supra* note 81; J. Mudd "Guidelines for a Quality Assurance Program for DNA RFLP Analysis" 16 *Crime Lab. Digest* (1989) 40.
89. K. Monson, *supra* note 29; M. Barinaga, *supra* note 74.
90. C. McGourty "New York State Leads on Genetic Fingerprinting" 341 *Nature* (1989) 90.
91. *ibid*.
92. E. Lander, *supra* note 29; R. Lewin, *supra* note 82; C. Norman "Maine Case Deals Blow to DNA Fingerprinting" 246 *Science* (1989) 1556.
93. A. Anderson "Forensic Tests Proved Innocent" 346 *Nature* (1990) 499.

המפורסם, ואולי המאלף ביותר בין המקרים, קרה באנגליה בשנת 1987.⁹⁴ כאן נעשה שימוש משולב בשיטות הסרולוגיות המקובלות ובאנליזת הדנ"א לפענוח שני מקרים של אונס נערות שנסתיימו ברצח, האחד בשנת 1983 והשני ב-1986. המשטרה חקרה צעיר והאשימה אותו ברצח הנערה במקרה שארע בשנת 1986. הדמיון בין המקרים החשיד את הצעיר בקשר למקרה הרצח שבוצע ב-1983.⁹⁵ הבדיקות הסרולוגיות המקובלות הראו, שאמנם שני הפשעים עשויים היו להתבצע על ידי אותו החשוד, אלא שתוצאות דומות היו מתקבלות גם מ-10% מהאוכלוסיה.⁹⁶

בשלב זה נכנס לתמונה ד"ר אלק ג'פריו, מפתח השיטה למטרות פורנזיות. הוא בדק דוגמות דם שנלקחו לאחר המות משתי הגופות, וכמו כן כתמי דם יבשים, כתמי זרע ומשטחים וגינליים שנלקחו מהקרבת. על אף שהדוגמאות היו בנות כמה שנים, איכות הדנ"א שהופק מהן אפשרה את הבדיקה. לאחר ביצוע בדיקה עם שני גלאים לאתר יחודי, מסר ג'פריו שהחשוד ברצח אינו קשור כלל למקרים אלו, אך שני הפשעים בוצעו ע"י אותו אדם.⁹⁸ לדבריו, פרופיל הדנ"א מהזרע משני המקרים היה זהה, כאשר הסכוי לזהות אקראית כזו באוכלוסיה הוא $2 \cdot 10^{-7}$.⁹⁹ הצעיר החשוד שוחרר, והמשטרה, שהיו לה סיבות לחשוד שהרוצח הוא מתושבי האזור ובן 13-30, אספה דוגמאות דם מ-5,500 גברים שהתגוררו באזור. השיטות הסרולוגיות שללו קשר של 60% מהגברים, ולגבי הנותרים הוכן פרופיל דנ"א מדוגמאות דמם. הפרופילים הושו לפרופיל הדנ"א מהזרע שנמצא בדגימות מקרבנות האונס. פרופיל הדנ"א של כל הנבדקים לא תאם את זה של הזרע.

כאשר המשטרה שקלה להרחיב את הבדיקות לגברים שמעבר לגיל 30 ולאיוזורים רחוקים יותר, הסתבר משיחה, שצותתה בפונדק מקומי, שאחד התושבים באיוזר נתן שתי דוגמאות דם, בשמו ובשם חבר לעבודה. לאחר חקירה הסגיר האיש את זהות המשתמט אשר נתפש, נבדק, ונמצא בעל פרופיל הדנ"א המבוקש. כשעומת עם התוצאות, הודה מיד והורשע בביצוע העבירות.¹⁰⁰ בדומה לכך, במקרים נוספים בארה"ב ובבריטניה, הודו נאשמים באשמה שיוחסה להם לאחר שראו את תוצאות בדיקת הדנ"א.¹⁰¹

מקרה שני שייך לתחום ההגירה, וקשור בילד מגאנה שנולד, אמנם, באנגליה, אך חזר לגאנה להיות עם אביו. כעבור כמה שנים, כשרצה לחזור לאנגליה אל אמו, אחיו ושתי

. B. Merz, *supra* note 56 .94

P. Gill & D. Werrett "Exclusion of a Man Charged With Murder by DNA .95
Fingerprinting" 35 *Forensic Sci. Int.* (1987) 145

. *ibid* .96

. Z. Wong, V. Wilson, I. Patel, S. Povey & A. Jeffreys, *supra* note 63 .97

. P. Gill & D. Werrett, *supra* note 95 .98

. Z. Wong, V. Wilson, I. Patel, S. Povey & A. Jeffreys, *supra* note 63 .99

. B. Merz, *supra* note 56 .100

. *ibid* .101

אחיותיו, סרבו שלטונות ההגירה לאפשר את חזרתו בטענה שיש חשד שאינו בנה של האשה אלא של אחותה או אולי אינו קשור כלל למשפחה. אנליזה סרולוגית הראתה שיש סיכוי סביר שהילד אמנם שייך למשפחת האם, אבל לא יכלה לקבוע אם הוא בנה או בן אחותה. עורך הדין של המשפחה ביקש מד"ר ג'פריו לבדוק את המקרה. המקרה נחשב כמסובך, מאחר שלא היתה אפשרות להשיג דם של האב ושל אחות האם, ובנוסף, האם לא היתה בטוחה בזהותו של אביו הביולוגי של הילד. הוכן פרופיל דנ"א של האשה, בנה, שתי בנותיה והילד העותר, בשיטה של גלאי לאתרים רבים. בשלב הראשון הרכיב ד"ר ג'פריו פרופיל של אב הילד בעזרת הפרופילים של שלשת ילדיו, לאחר שהחסיר מהם את הפסים שמקורם באם. הפרופיל שהתקבל מהאב כלל 40 פסים, אשר מחציתם הופיעו בפרופיל של הילד. ממצא זה הצביע על כך שאמנם זהו האב הביולוגי. לאחר מחיקת הפסים, השייכים לאב, מהפרופיל של הילד כל הפסים שנשארו נמצאו בפרופיל של האם, ולפיכך היא אמנם אימו ולא דודתו.¹⁰² האפשרות לקבוע בוודאות בעזרת הדנ"א אבהות,¹⁰³ או שייכות משפחתית של ילד להוריו, תהיה כשימוש גם במקרה שיש צורך בויהוי חללים או נעדרים לפי הוריהם המשווערים.¹⁰⁴

פרופיל דנ"א, שהוכן כאנגליה משרשי שערות של חשוד שסירב לתת דגימת דם, גרם להרשעתו באונס שתי קשישות, לאחר שפרופיל הדנ"א מהשיער תאם את זה של הזרע במוצג.¹⁰⁵

מקרה מארה"ב, הידוע כ- Dotson Case, עסק באדם שהורשע באונס ונדון למאסר ממושך על סמך עדות המתלוננת, לאחר שבדיקות סרולוגיות תמכו באפשרות שאמנם הוא האנס. לאחר 8 שנים, בהם שהה במאסר, נסוגה המתלוננת מהאשמתה, וטענה שלא היה כלל מקרה אונס, וכתמי הזרע שייכים לחבר שלה באותה תקופה. נעשתה בדיקת דנ"א לדוגמת הזרע שנשמרה מאז המקרה. מאחר שהדנ"א היה מפורק בתלקן, הוחלט להשתמש בשיטת ה-PCR בהשוואה לדנ"א שהתקבל מהאשה, החבר והאסיר, התברר, שכתם הזרע מתאים לחבר ולא לאסיר, וזה שוחרר מהכלא.¹⁰⁶

ז. סיכום

הכלים שנותנת בידינו הביולוגיה המולקולרית, מאפשרים זיהוי של מקטעי דנ"א יחודיים בכרומוזומים של האדם. לטכנולוגיה זו גם השלכות מעשיות למדע הפורנוי. על ידי שימוש באנזימי רסטריקציה מתאימים ובקבוצה של גלאים לאתרים

102. R. Lewin, *supra* note 14; A. Jeffreys, J. Brookfield & R. Semeonoff, *supra* note 59; W. Hill "DNA Fingerprint Analysis in Immigration Test-Cases" 322 *Nature* (1986) 290.

103. P. Newmark, *supra* note 74.

104. B. Gaudette, *supra* note 46.

105. T. Kirby "Hair Root Cells Secure Conviction of Rapist" 17 June *Independent* (1989).

106. H. Erlich, *Personal Communication*.

פולימורפים בדנ"א, ניתן לצבור מספיק נתונים כדי להרכיב פרופיל דנ"א בעל רמת הפרדה כמעט אינדיבידואלית.
פרופיל הדנ"א המתקבל יכול להצביע על קיום או אי קיום קשר בין מוצג מהמקרה לבין אדם הנחשד כמעורב במקרה, ותרומתו בכך למהלך החקירה ולהליך עשיית הדין רבה ביותר.

