



## מדוע לחלק מהאנשים יש דנ"א ניאנדרתלי?

Jente Ottenburghs\*

המחלקה לאקולוגיה וגנטיקה, אוניברסיטת אופסאלה, אופסאלה, שבדיה

האם ידעתם שלמרבית האנשים יש בערך 3% של גֵנִים ניאנדרתלים? לפני כ-40,000 שנים, בני אדם קדמונים וניאנדרתלים הולידו ילדים יחד. הערבוב בין שני המינים הוביל להחלפה של דנ"א, תהליך שביולוגים מכנים אינטרוגרסיה. כשהניאנדרתלים נכחדו, בני אדם יכלו להוליד ילדים רק עם בני אדם אחרים. במהלך הזמן, אחוז הדנ"א הניאנדרתלי הלך ונעלם, אולם נשאר כ-3% ממנו. הגֵנִים הניאנדרתלים נשארו בגנומים שלנו מאחר שהם שימושיים עבורנו. גנים שבני אדם קיבלו מניאנדרתלים ממלאים תפקיד באזורים שונים בגוף, כולל במוח ובמערכת העיכול. הגנים הניאנדרתלים האלה עשויים להיות אלו שעשו בני אדם לחכמים יותר, והאיצו את ההסתגלות שלנו לדיאטות חדשות. מספר גנים ניאנדרתלים גם מעורבים במערכת החיסון ומסייעים לנו להילחם כנגד וירוסים וחיידקים מזיקים. בהסתכלות לאחור, ייתכן שזה היה טוב שהאבות הקדמונים שלנו הולידו ילדים עם ניאנדרתלים. הגנים שלהם סייעו למין שלנו לשרוד עד היום הזה.

### הקדמה

כשאתם משלבים אריה עם טייגר (טיגריס), אתם תקבלו לייגר. החיה הגדולה הזו היא בדרך כלל עקרה, כלומר אינה יכולה להוליד צאצאים. במשך זמן רב, מדענים חשבו שהצאצאים

#### סוקרות צעירות

ANNA-MARIE

גיל: 15



CAROLYN

גיל: 14



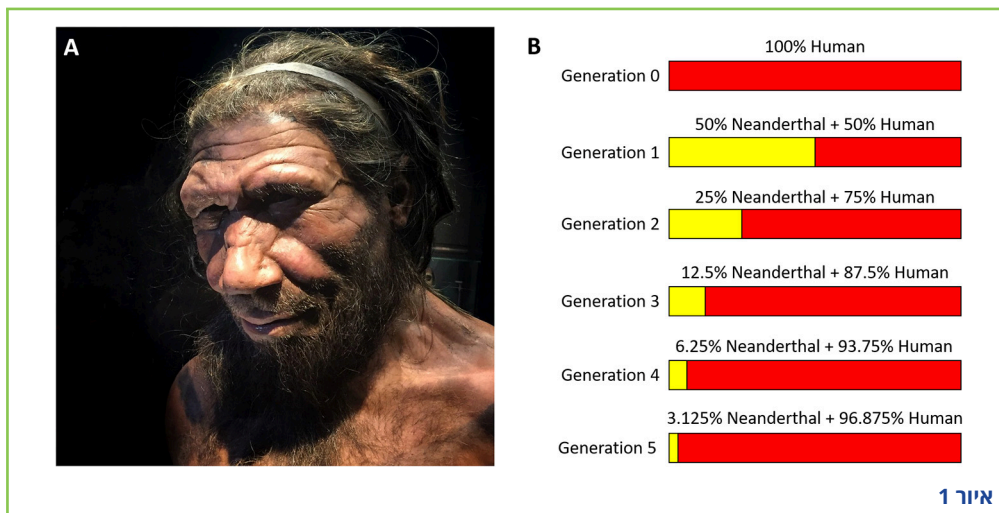
NADYA

גיל: 13



**איור 1**

(A) תמונה של ניאנדרתל במוזיאון להיסטוריה של הטבע בלונדון (בריטניה) (על-ידי Allan Henderson, זכויות יוצרים 2.0 Flickr). (B) כשבני אדם הזדווגו עם ניאנדרתלים, תוצאת ההיברידי הייתה 50% דנ"א אנושי ו-50% דנ"א ניאנדרתלי. אם להיברידי האלה היו ילדים עם בני אדם, אחוז הדנ"א הניאנדרתלי ירד ל-25%. בכל דור נוסף של הולדת ילדים עם בני אדם, אחוז הדנ"א הניאנדרתלי ירד בחצי באופן הבא: 3.125-6.25-12.5-25-50



**היברידי (Hybrid)**

ערבוב בין מינים שונים.

**אינטרוגרסיה (Introgession)**

החלפת דנ"א בין מינים שונים באמצעות היברידיזציה.

משילוב בין מינים שונים – שנקראים **היברידיים** – תמיד יהיו עקרים. אולם, מחקר מאוחר יותר חשף שחלק מההיברידיים יכולים להוליד צאצאים משלהם. בשנת 1943, לדוגמה, ליינר הולידה צאצאים עם אריה בנן החיות הגרמני הלאבורן. כשההיברידיים מזדווגים עם אחד ממיני ההורים שלהם, כמו למשל הליינר והאריה בגרמניה, דנ"א יכול לזרום ממין אחד לאחר. התהליך הזה מכונה **אינטרוגרסיה** [1].

אינטרוגרסיה מסבירה מדוע בני אדם קיבלו חלק מהדנ"א הניאנדרתלי. במשך זמן רב, בני אדם חיו רק בסאוונה באפריקה. לפני כ-45,000 שנים, הם עזבו את אפריקה והיגרו לאירופה, שם הם באו במגע עם מין דמוי-אדם אחר – הניאנדרתלים (הומו ניאנדרתלנסיס). הניאנדרתלים לא נראו שונים מאוד מבני אדם. הם היו מעט יותר חסינים, היו להם ידיים ארוכות יותר, והיה להם רכס גבות מרשים מעל לעיניים (איור 1A). לחלק מבני האדם היו ילדים עם הניאנדרתלים האלה. כשילדים אלה גדלו, היו להם ילדים משלהם. וכך הלאה. הערבוב של שני מיני בני האדם הוביל לאינטרוגרסיה, החלפה של דנ"א. מאחר שבני אדם וניאנדרתלים הולידו ילדים רק מחוץ לאפריקה, אתם לא תמצאו דנ"א ניאנדרתלי כיום באנשים באפריקה. אולם בשאר העולם, לאנשים יש דנ"א ניאנדרתלי.

**שילוב צבעים**

אולם, מדוע למרבית בני האדם יש 3% דנ"א ניאנדרתלי? הדנ"א של ההיברידיים בני אדם-ניאנדרתלים היה 50% אנושי ו-50% ניאנדרתלי. אם להיברידיים האלה היו ילדים עם בני אדם, אחוז הדנ"א הניאנדרתלי היה צונח לכ-25%. הדור הבא, האחוז היה יורד שוב בחצי. בנקודה מסוימת, הניאנדרתלים נכחדו. איננו יודעים עדיין בדיוק מדוע. התוצאה של אירוע ההיכחדות הזה הייתה שבני אדם יכלו להוליד ילדים רק עם בני אדם אחרים. לא יכל להתווסף דנ"א ניאנדרתלי לנגום האנושי, ואחוז הדנ"א הניאנדרתלי ירד ל-3% שאנו רואים היום.

אתם יכולים להשוות את התרחיש הזה לערבוב של שני צבעים. בואו נאמר שאתם שופכים צבע צהוב (ניאנדרתלי) ואדום (בני אדם) בדלי גדול. התוצאה היא צבע כתום מעורבב, מה שמייצג את ההיברידי בן אדם-ניאנדרתל הראשון. כשאתם מוסיפים עוד צבע אדום, התערובת

נעשית יותר ויותר אדומה עם הזמן. במילים אחרות, הדנ"א נעשה יותר ויותר אנושי ככל שהזמן עובר, כשבני אדם מולידים ילדים עם בני אדם אחרים.

אם אנו עושים את החשבון, נוכל לראות שאנו מגיעים ל-3% דנ"א ניאנדרתלי אחרי כ-5 דורות של בני אדם שמזדווגים עם בני אדם אחרים. בכל דור, אחוז הדנ"א הניאנדרתלי ירד בחצי, באופן הבא: 50-25-12.5-6.25-3.125 (איור 1B). בואו נניח שדור אחד אורך כ-25 שנים, הגיל שבו אנשים עשויים להוליד ילדים. אז, בני אדם צריכים להגיע ל-3% דנ"א ניאנדרתלי אחרי כ-125 שנים (25X5). אולם בני אדם וניאנדרתלים הזדווגו לפני יותר מ-40,000 שנים! זה הבדל גדול. אחוז הדנ"א הניאנדרתלי צריך להיות הרבה, הרבה יותר נמוך. כדי להבין מדוע לא איבדנו את כל הדנ"א הניאנדרתלי, אנו צריכים ללמוד על קונספט אחר: אינטרוגרסיה הסתגלותית.

## זאבים שחורים

כדי להבין אינטרוגרסיה הסתגלותית, אנו נטייל לצפון אמריקה, שם מסתובבות להקות של זאבים. אם אתם צופים בסדרות תיעודיות על הטבע, אולי הבחנתם בכך שלזאבים האלה יש פרווה שהיא ברובה אפורה. מהיכן הגיעה פרווה כהה? המדענים שחקרו את הדנ"א של הזאבים האלה גילו שפרווה כהה נגרמה על-ידי וריאציה מסוימת של גן. באופן מפתיע, לזאבים בדרך כלל אין את הווריאציה בגן הזה. אולם לכלבים יש! ניתוח נוסף גילה שבעבר כלבים וזאבים הולידו יחד גורים. השילוב בין שני המינים האלה הוביל להחלפה של דנ"א, כולל הווריאציה הזו בגן שנתנה לזאבים פרווה כהה [2]. בגלל הצבע הכהה יותר הזה, הזאבים האלה הצליחו להסוות את עצמם טוב יותר ביער, מה שגרם להם להיות ציידים טובים יותר. תחלופת הדנ"א – או האינטרוגרסיה – סייעה לזאבים להסתגל לסביבה שלהם. זו הסיבה לכך שהתהליך הזה נקרא אינטרוגרסיה הסתגלותית. פרטים עם פרווה כהה יותר שרדו טוב יותר מאשר חבריהם האפורים, והיו להם יותר גורים. הגורים האלה נראו כמו ההורים שלהם, וגם להם הייתה פרווה כהה יותר. במהלך הזמן, הווריאציה הגנטית של פרווה כהה יותר הפכה לשכיחה באוכלוסייה (איור 2). ביולוגים אבולוציוניים אומרים שהתכונה של פרווה כהה הייתה כפופה ל**בריירה טבעית**. אם אנו חוזרים לאנלוגיה של ערבוב שני צבעים, אתם יכולים להשוות את הווריאציה הגנטית המועילה, כמו פרווה כהה, לטיפה קשה של צבע צהוב. לא משנה כמה צבע אדום תוסיפו, הטיפה הצהובה עדיין לא תתערבב, היא תמשיך לצוף סביב בתערובת האדומה.

## גנים ניאנדרתלים מועילים

אותה אינטרוגרסיה הסתגלותית התרחשה עם דנ"א של ניאנדרתלים. חלק מהגנים התבררו כמועילים עבור בני אדם, ולא נעלמו מהדנ"א האנושי. 3% מהדנ"א הניאנדרתלי יכול להיות מושווה לכמה טיפות צהובות שצפות ברחבי הצבע האנושי האדום. אילו יכולות ה**סתגלות (התאמה)** הגנים הניאנדרתלים האלה סיפקו לנו? מדענים מכינים קטלוג של כל הגנים המועילים שקיבלנו מהניאנדרתלים [3, 4]. בואו נתבונן בחלק מהגנים האלה. הגן מיקרוצפאלין (MCPH1), לדוגמה, מוודא שההתפתחות של המוח מתרחשת בהתאם לתוכנית. אולי הגן הניאנדרתלי הזה גרם לבני אדם להיות חכמים יותר, ומסוגלים יותר לשרוד במקומות חדשים. גנים ניאנדרתלים אחרים, כמו למשל הקולטן של חוש הריח 12D3 (OR12D3), הם חשובים לעיכול מזון. בני אדם שהגיעו לאירופה התמודדו עם סוגים שונים של מזון חדש. הגנים

### ברירה טבעית

#### (Natural Selection)

תהליך האבולוציה שבו לאורגניזמים עם תכונות מועדפות יש סיכויים טובים יותר להתרבות. בעקבות ההתרבות הזו, הם מעבירים את התכונות האלה לדור הבא. במהלך הזמן, התהליך הזה מאפשר לאורגניזמים להסתגל לסביבה שלהם.

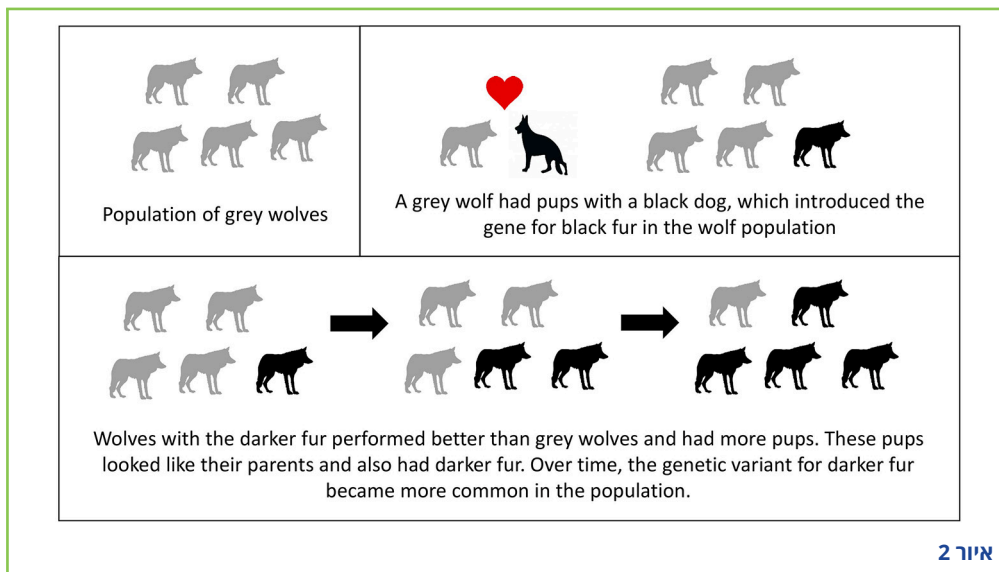
### הסתגלות (התאמה)

#### (Adaptation)

תכונה שמגדילה את יכולת ההישרדות והרבייה של פרט בהשוואה לפרטים אחרים באוכלוסייה.

**איור 2**

בגלל ההיברידיזציה עם כלבים, זאבים רכשו וריאציה גנטית של פרווה שחורה. הצבע השחור הזה גרם לזאבים להיות יותר מוסווים ביער, ולכן הפך אותם לציידים טובים יותר. הזאבים האלה היו בעלי סיכויים טובים יותר להוליד גורים. במהלך הזמן, הווריאציה הגנטית של פרווה כהה נעשתה שכיחה יותר באוכלוסייה.



**איור 2**

מהניאנדרתלים סייעו להם להסתגל במהרה לדיאטה החדשה. חלק מהגנים אולי אפילו שינו את מבנה השיניים שלנו!

כמה גנים שבני אדם קיבלו מניאנדרתלים, ככל הנראה גם ממלאים תפקיד חשוב במערכת החיסון, בהגנה עלינו מפני מחלות מסוימות. הגנים האלה מייצרים חלבונים שסוקרים את גוף האדם בחיפוש אחר חיידקים ווירוסים מזיקים. כשהם פוגשים אחד, הם תופסים אותו ומוודאים שהוא לא יעשה עוד נזק לגוף. זה דומה לשוטר שעושה סיורים ברחובות ומחפש פושעים, ואם הוא מוצא אותם הוא מכניס אותם לכלא. כשבני אדם הגיעו לאירופה, הם פגשו הרבה מחלות חדשות שלא היו קיימות באפריקה. הגוף שלהם לא הכיר את המחלות האלה, והם חלו במהרה. הניאנדרתלים, לעומת זאת, התמודדו עם המחלות האלה במשך אלפי שנים, והדנ"א שלהם הכיל את הגנים הנכונים כדי להילחם כנגד הוורוסים והחיידקים שגרמו למחלות האירופאיות האלה. כשבני אדם קיבלו דנ"א ניאנדרתלי, הם גם קיבלו גנים שנלחמים בוורוסים וחיידקים האלה. אתם יכולים לומר שבני אדם קיבלו קבוצה של שוטרים שמכירים את הפושעים של האזור. זה הקל על תפיסת הפושעים, והכנסתם לכלא. כפי שאתם יכולים לראות מהדוגמאות האלה, הגנים הניאנדרתלים בדנ"א שלנו היו מועילים מאוד.

**מסקנות**

אז, אם אינכם אפריקאים, הדנ"א שלכם מכיל טיפה של גנים ניאנדרתלים. הגנים האלה נותרו בסביבה מאחר שהם ככל הנראה מועילים לאנשים, ומסייעים למין שלנו לשרוד עד היום. בהתבוננות לאחור, זה עשוי להיות טוב שלאבות הקדמונים היו ילדים עם ניאנדרתלים. ואם תחשבו על זה, ניאנדרתלים מעולם לא נכחדו לחלוטין בעצם - הם חיים בדנ"א של בני אדם מודרניים.

## מקורות

1. Arnold, M. L. 2006. *Evolution Through Genetic Exchange*. New York, NY: Oxford University Press.
2. Anderson, T. M., vonHoldt, B. M., Candille, S. I., Musiani, M., Greco, C., Stahler, D. R. et al. 2009. Molecular and evolutionary history of melanism in North American gray wolves. *Science*. 323:1339–43. doi: 10.1126/science.1165448
3. Racimo, F., Sankararaman, S., Nielsen, R., and Huerta-Sánchez, E. 2015. Evidence for archaic adaptive introgression in humans. *Nat. Rev. Genet.* 16:359–71. doi: 10.1038/nrg3936
4. Dolgova, O., and Lao, O. 2018. Evolutionary and medical consequences of archaic introgression into modern human genomes. *Genes*. 9:358. doi: 10.3390/genes9070358

פורסם אונליין: 09 בנובמבר 2021

נערך על ידי: Andrés Juan Rinderknecht, Museo Nacional de Historia Natural, Uruguay

ציטוט: Ottenburghs J (2021) מדוע לחלק מהאנשים יש דנ"א ניאנדרתלי? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00104-he

תורגם והותאם: Ottenburghs J (2019) Why Do Some Humans Have Neanderthal DNA? *Front. Young Minds* 7:104. doi: 10.3389/frym.2019.00104

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

**COPYRIGHT** © 2019 © Ottenburghs 2021. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרות צעירות

**ANNA-MARIE, גיל: 15**

המקצוע האהוב עליי הוא ביולוגיה, אני אוהבת ביוניקה. בעתיד אני רוצה לעבוד על חומרים חדשים, מצעים חדשים. אני סקרנית לגבי תעלומות היקום, יש כל כך הרבה לגלות.

**CAROLYN, גיל: 14**

בעבר נהגתי לחלום על הפיכה למדענית. התעניינתי בחיות ובצמחים, אולם כשהבנתי שהייתי צריכה לנתח צפרדע, החלטתי לשנות את חלום העתיד שלי ולהיות סופרת. אז היום אני אוהבת לכתוב סיפורים בקליפים.



אני עדיין אוהבת מדע מספיק, ואני אוהבת את הניסויים שקשורים בצמחים. אני מאמינה שמדע הוא הכרחי עבור שמירה על כדור הארץ מהתחממות גלובלית, שאני מתעניינת בה מאוד.

### NADYA, גיל: 13

אני אוהבת לצייר ולקרוא, ואני רוצה להיות מורה לאומנות כשאגדל. הספרים האהובים עליי הם סדרת הארי פוטר. אני בדרך כלל בחדר שלי, מציירת או מכינה תכשיטים. אומנות ומדע הם המקצועות האהובים עליי בבית הספר. זה מעניין ללמוד על כדור הארץ הזה, ואני רוצה ליצור בו שינוי יום אחד.

### הכותב

#### JENTE OTTENBURGHS

קיבלתי את הדוקטורט שלי באוניברסיטת וואגנינגן (בהולנד) שם חקרתי היברידיזציה בין מיני אווזים שונים. כיום, אני מרחיב את קו המחקר הזה לפוסט-דוקטורט באוניברסיטת אופסאלה (שבדניה). במחקר הפרטי שלי, אני משתמש בכמה שיטות שפותחו כדי לחקור היברידיזציה בין בני אדם לניאנדרתלים. אני מתעניין באופן שבו היברידיזציה ותוצאת החלפת הדנ"א שלה השפיעו על האבולוציה של מינים שונים. בבלוג שלי Avian Hybrids אני חוקר את תפקיד ההיברידיזציה באבולוציה של ציפורים.  
\*jente.ottenburghs@ebc.uu.se



Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ער.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

