

רות ברנשטיין, אילנה שור, רות וולק\*

## היבטים דידיאקטיים בהוראת הפוטוסינתזה

כל היצורים החיים זקוקים לתרכובות אורגאניות כמקור לבניית גופם וכמקור להספקת אנרגיה לשם קיום תהליכי החיים.

הפוטוסינתזה היא התהליך היחיד שבו נבנות תרכובות אורגאניות מחומרים אנאורגאניים המצויים בקליפת כדור-הארץ ובאטמוספירה, תוך ניצול אנרגיית האור מן השמש. מכאן שכמעט כל קיום החיים, כפי שאנו מכירים אותם על-פני כדור-הארץ, מותנה באופן מתמיד בתהליך הפוטו-סינתזה.

תוצר חשוב נוסף של הפוטוסינתזה הוא חמצן הנפלט מן הצמחים אל האטמוספירה. גם הוא חומר חיוני, כמעט לכל האורגאניזמים.

## שיקולי-דעת בהוראת הפוטוסינתזה

חשיבותה ומקומה של הפוטוסינתזה בעולם החי מחייבים לשלבה בלימודי הביולוגיה מוקדם ככל האפשר; ועם זאת, לימוד הנושא מצריך ידע בסיסי בכימיה ובהבנת מושג האנרגיה - דבר שתלמידים רוכשים אותו בעמל, ובשלב מאוחר-יחסית של לימודיהם.

בהתרשמות בלתי-אמצעית של המורים וכן במחקרים שנעשו, נמצא שיש לתלמידים קשיים רבים, וכן קיימים אצלם סילופים וטעויות בהבנת

---

\* רות ברנשטיין ואילנה שור הן מדריכות דידיאקטיות לביולוגיה במכללה לחינוך על-שם דוד ילין. ד"ר רות וולק היא מרכזת החוג למדעי-הטבע במכללה.

התהליכים המתרחשים בפרוטוסינתזה ובהבנת משמעותם ותרומתם לעולם החי.

כדי שהלמידה תהיה משמעותית בהתאם לגיל הלומדים ולקשייהם, יש לבחור דרכי הוראה שיעלו את הקשיים ויאפשרו עימות בין התפיסות השגויות לבין התפיסה המדעית.

אנו מציעות כאן כמה דרכים דידיקטיות, שעשויות לסייע בחוראת המושגים המדעיים הדורשים הפשטה:

1. יצירת קונפליקט קוגניטיבי (יצירת דיאלוג).
2. שימוש באנאלוגיות.
3. שימוש במפות מושגים.
4. עריכת ניסויים ותצפיות.

**1. יצירת קונפליקט קוגניטיבי**

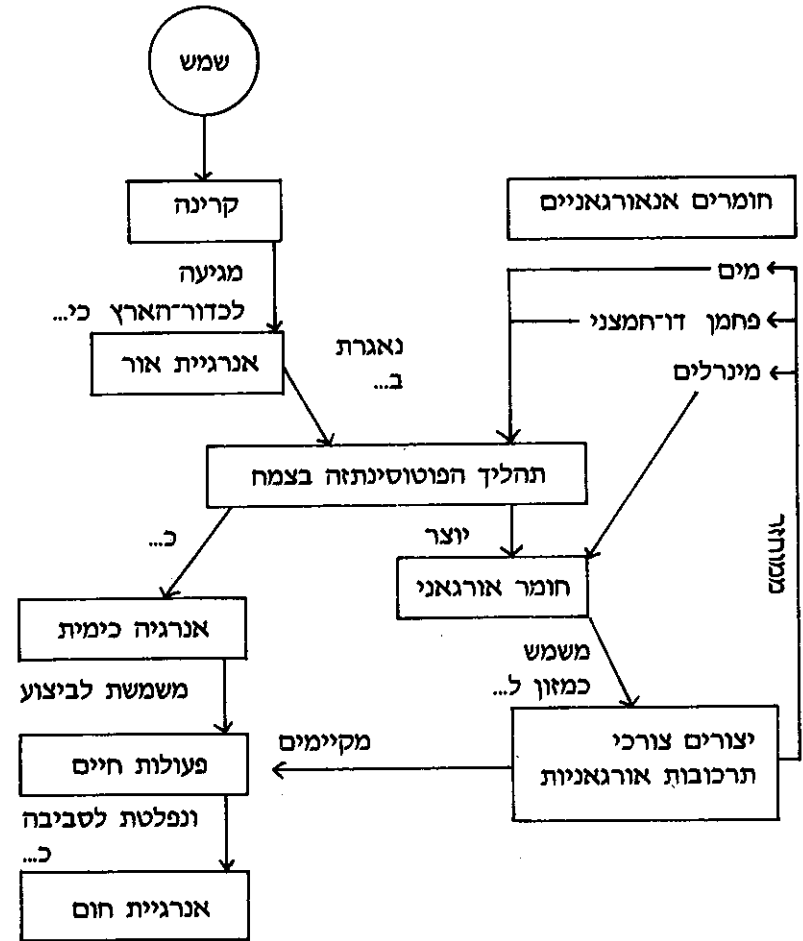
הקונפליקט הקוגניטיבי מכריח את הילד לחשוף ולבחון את תפיסותיו המוקדמות, להשוותן ולעמתן עם התוכן הנלמד, ומחייב קיום דיאלוג בין התלמיד, המורה והחומר הנלמד. דרך זו מנתבת את התלמיד למעורבות רבה יותר בלמידתו. (ראה שאלות בסעיף "התייחסות אל הצמח").

**2. שימוש באנאלוגיות**

השימוש באנאלוגיה יכול להוות גשר בין חשיבה מוחשית לבין חשיבה מופשטת. בכל מקרה, יש להציג את הצדדים השונים של האנאלוגיה, את הדומה ואת השונה בינה לבין המיוצג ולציין את מגבלותיה - כדי שהתלמידים לא יחליפו בין הדבר עצמו לבין האנאלוגיה. (ראה הסעיף "התייחסות לכלורופיל").

**3. שימוש במפות מושגים**

שימוש בסכמה או במפת מושגים מעין זו המובאת לעיל מסייע להבנת הקשר בין המושגים השונים ולראיית התמונה הכוללת על מרכיביה. הסכמה מאפשרת להקשרים האסוציאטיביים של כל אחד מן הלומדים לבוא לידי ביטוי (אין סכמה אחת נכונה, אם כי יש סכמות טובות יותר או טובות פחות, ביחס למטרה המוצבת).



מבחינת התוכן, אפשר להשתמש בסכמות לפתיחה, לסיכום או לשילוב בתהליך הלמידה. מבחינת המבצע, היא יכולה להיות מובאת בידי המורה או להינתן כתרגיל להרכבה בידי התלמידים (בקבוצות, בעבודה יחידנית, כתחרות, לצורך הערכה, ועוד).

#### 4. עריכת ניסויים ותצפיות

אפשר להשתמש בניסוי כחלק מן המתודה המדעית. אנחנו מדגישות את ערכו כאמצעי דידיאקטי. הניסוי ממלא תפקיד שונה לגבי תלמידים בעלי יכולות למידה שונות. בניסוי יש פעילות, המחשה, וקישור בין מרכיבים: בין פרטי התוכן שנלמד לבין הכלל התיאורטי; בין הרעיון המופשט לבין דוגמה מוחשית.

האופן שבו יובא הניסוי לפני התלמידים יותאם לתפקיד שהוא אמור לשרת (בהתאם לגיל הלומדים, להרכב הכיתה, לתוכן ולמטרות הדידיאקטיות).

בכל אחת מן הדרכים הננקטות יש לחשוף בעת תהליך ההוראה את תפיסות התלמידים, למשל באמצעות שאילת שאלות, שמזמינות תשובות שבהן נחשפות הטעויות.

דוגמאות לשיקולי-דעת בתכנון הוראת הנושא פוטוסינתזה:  
התהליך מתרחש בצמח באמצעות האור והכלורופיל; ולכן, בין יתר ההתייחסויות יש לכלול מושגים אלה בתהליך ההוראה-למידה:

#### 1. ההתייחסות אל הצמח

ההתייחסות אל הצמח מאופיינת במוטיבאציה נמוכה בכל מה שקשור לתכנים הנלמדים בנושא, ובתפיסות שגויות של הלומדים על מהותו של הצמח.

ההתייחסויות הללו נובעות מן המקורות המשוערים הבאים:  
א. התפיסה האינטואיטיבית של חיים מבוססת על קליטה של שינויים חיצוניים הנתפסים על-ידי החושים. המושג חיים מתקשר לתנועה ולשינויים חיצוניים. למשל: הנשימה, שהיא תהליך ביוכימי המתרחש בתאים, נתפסת אצל רוב האנשים כהכנסה והוצאה של אוויר באמצעות האף והפה, כלומר על-ידי אותו חלק חיצוני שנתפס באמצעות החושים.

אצל בעלי-חיים אנחנו מבחינים בהשתנות מתמדת (תנועה, אכילה, תגובה לגירויים), וזה בסיס ההתרשמות שלנו לבניית המושג חי. הצמח

אינו נע ממקום למקום, קצב השינויים המתרחשים בו והנראים לעין הוא איטי, ולכן מתקבל הרושם שאין בו דינאמיות. משום כך, ההתרשמות החושית מן הצמח היא של ישות אחרת, שונה, נפרדת. למעשה, תהליכי החיים החשובים ביותר הם הסמייים מן העין, ובהם יש דמיון רב בין הצמחים ובין בעלי-החיים. תהליך הנשימה, כתהליך ביוכימי, זהה בצמחים ובעלי-החיים, אלא שאצל בעלי-החיים הוא מקבל בדרך כלל ביטוי חיצוני כלשהו, ואילו בצמחים לא, וחוסר הביטוי החיצוני הזה נתפס כהיעדר תהליך.

באותו האופן אפשר לראות את תהליך ההזנה: אצל בעלי-החיים, תהליכי ההזנה גלויים לעין, מרשימים וכוללים פעילות אקטיבית רבה (תנועה, תפיסת טרף, לעיסה וכו'), ואילו אצל הצמחים תהליך ההזנה, שהוא תהליך הפוטוסינתזה - הוא פנימי, ואינו ניתן להבחנה חיצונית פשוטה ומהירה.

ב. העובדה שבעלי-החיים דומים לאדם מסייעת לנו לתפוס אותם כחיים ולהתעניין בהם. יש לנו חוויות ופעולות דומות מאוד לאלה של בעלי-החיים: רעב, כאב, תנועה, אכילה, טיפול בצאצאים, וכד'. את חוויות החיים שלנו אנחנו יכולים בקלות להשליך על בעלי-החיים, ולכן אנחנו יכולים לראותם כיצורים חיים ולהתעניין בהם ככאלה. הצמחים נראים שונים כל-כך מאיתנו, ולכן הם בדרך-כלל אינם מעניינים את התלמידים.

ג. הצמחים נתפסים בתודעתנו כתלויים בנו. התעניינותנו בהם מוגבלת בדרך-כלל לאותם צמחים שאנחנו מגדלים, או לכאלה שאיננו מגדלים במכוון אך עושים בהם שימוש. הדבר מתקשר לתרבות המעמידה את האדם במרכז הבריאה. ההתעניינות שלנו, כבני-אדם, בסביבה - מקורה ברצון להבין את עצמנו, ולכן, לעתים קרובות מה ששונה מאיתנו ולא ניתן להשוואה אלינו - מעניין פחות.

לסיכום, אפשר לומר שהצמח נתפס כפאסיבי מצד אחד וכתלוי באדם מצד שני, בעוד שלמעשה התמונה הפוכה: תהליך הפוטוסינתזה, המתרחש בצמחים, הוא אנרגטי מאוד, וכל האנרגיה של עולם החי, כולל האדם, תלויה בו.

כדי להגיע ללמידה משמעותית של נושאים הקשורים בצמחים, עלינו לגרום למעורבות אמיתית של הלומדים בנושא.  
אפשר להגיע להתעניינות בצמחים בכמה כיווני התייחסות:

1. התועלת. אם נלמד ונדע יותר על הצמחים, יש סיכוי שנפיק מהם יותר תועלת (כמקור מזון, כמקור לחומרי-גלם, כקישוט, וכד'). בהמשך חיבורנו זה לא נתייחס לאספקט זה.
2. ניסיון לעורר את הלומד לחסתכלות בתהליכים הפנימיים המתרחשים בצמחים. מן ההיבט הזה נראה הדמיון אל בעלי-החיים (כולל האדם) רב מן השוני. דבר זה דורש שלא ניגרר אחר החיצוני, ודבר זה כרוך במאמץ לא קטן.  
כיצד מעוררים את הלומד לראות את הפנים ולהתעלם מן החוץ? או, האם החוץ מעיד על הפנים? שאלות אלה הן בעלות חשיבות בכל שלב ובכל תוכן נלמד, ולכן כדאי להעלותן כל פעם מחדש, בעזרת דוגמאות; כמו למשל:  
א. דברים השונים מאוד בביטויים החיצוני, על אף הזהות במהות הפנימית שלהם:  
**דוגמאות:**  
1. יהלום, גרפיט ופחם - אותו חומר מבחינה כימית, אך שונה בצורתו החיצונית.  
2. ביטויים שונים לאותו רגש (בכי וצחוק כביטוי לשמחה).  
ב. דברים הנראים דומים בחיצוניותם אך שונים במהותם הפנימית:  
**דוגמאות:**  
1. זכוכית ויהלום.  
2. ביטויים חיצוניים שווים לרגשות שונים (בכי - כביטוי לשמחה ולעצב).  
3. אותם כלים (צורה ושימוש) הבנויים מחומרים שונים.  
4. גופים דומים הבנויים מחומרים שונים - פרח אמיתי ופרח מפלסטיק.  
3. חשיפת חשיבותו העליונה של תהליך הפוטוסינתזה לקיומם של החיים על-פני כדור-הארץ.  
יצירת קונפליקט קוגניטיבי אצל הלומד, בנושא קיום החיים בכלל והאדם והצמח בפרט - יכולה לעזור בהשגת היעד של למידה בעלת משמעות; למשל:  
\* איזה מין עולם יהיה אם נגדע ונתלוש את כל צמחיית העולם? איך יתקיימו בו בני-האדם?  
\* כל אדם, אם יישאל, יאמר שהוא אוכל כדי שיוכל לפעול, לגדול וכד'. הצמח גדל, מתפתח ומתרבה. האם ראיתם פעם צמח אוכל?

2. ההתייחסות אל האור  
נוכחות האור נתפסת בחיי היומיום כמובנת מאליה - כמשרה אווירה, כרקע, או כאמצעי להתגבר על החושך.  
האנרגיה המוכרת לנו כפועלת היא בדרך-כלל אנרגיית חום. אנחנו מכירים דוגמאות רבות שבהן החום מפעיל תהליכים. האור כאנרגיה הוא מופשט, בעוד החום כאנרגיה הוא מוחשי. אנשים מעטים מודעים לכך שמבין סוגי האנרגיה, החום הוא הצורה הפחות יעילה מכולם, ואילו האור הוא צורה יעילה הרבה יותר.  
כדי להבין את תפקידו של האור כפועל בתהליך הפוטוסינתזה, יש צורך להביא לתודעת הלומדים את העובדה שהוא ישות מפעילה. יש דרכים שונות לעשות זאת, למשל:

- א. להציג את התכונות הפיסיקליות של האור (כגלים אלקטרו-מגנטיים וכזרם של פוטונים).
- ב. להביא דוגמאות המדגישות את פעילותו של האור. רצוי להביא דוגמאות המוכרות מחיי היומיום. הדוגמאות שלחלן לקוחות מן התחומים: דומם, צומח, בעלי-חיים.

  1. האור מפעיל את חוש הראייה שלנו; הוא מאפשר לנו להבחין בין אור לחושך, בין סוגי צבעים, להבחין בצורות.
  2. הוא מחמם: זכוכית מגדלת המרכזת אור מאפשרת שריפה; קרן לייזר צורבת וגם תותכת; דוד שמש, שיש בו התמרה של אנרגיית אור לחום (מים חמים).
  3. הוא משנה חומרים על לוח צילום.
  4. הוא משזף.
  5. הוא משנה חומרים רגישים (דהייה, שינוי בתרופות).
  6. הוא גורם לצמחים להיות ירוקים.
  7. הוא גורם להתפתחות ויטמין D.
  8. הוא מפעיל תא פוטואלקטרי - גורם לתנועת אלקטרונים (מחשבוני, פתיחה אוטומטית של דלתות).
  9. הוא מניע תהליכים - פוטורופיזם, פוטופריודיזם.
  10. הוא יוצר אפקט פלואורסצנטי.
  11. והעיקר: הוא מפעיל את הפוטוסינתזה!!!

ריאקציות האור - מה האור "עושה" בתהליך הפוטוסינתזה?  
ברוב ספרי-הלימוד מתחילים את הוראת הפוטוסינתזה בחצגת

הנוסחה הכללית, המדגישה את החומרים המשתתפים בתהליך, בתחילתו ובסופו.



הצגת התהליך בצורה זו יוצרת כמה בעיות דידיאקטיות:

- א. הנוסחה אינה כוללת את תפקידה של אנרגיית האור בתהליך; היא מציינת רק את החומרים המשתתפים בתהליך, ועובדה זו נותנת את ההרגשה שתפקיד האור הוא שולי.
- ב. אין מטפלים בשלבי הביניים, שהם מהות התהליך. במתמטיקה חשובים ההתחלה והסוף; הדרך אינה משנה, בדרך-כלל. בביולוגיה חשובה הדרך; היא מהות התהליך.
- ג. אצל המורה נוצרת אשליה כאילו הנוסחה ממחישה את התהליך, בעוד שבעיני התלמיד היא מופשטת מאוד.
- ד. היא מהווה מקור לבלבול בין תהליך הפוטוסינתזה ובין הנשימה: בשניהם משתתפים אותם חומרים, אולם התהליך שונה מבחינה אנרגטית, מבחינת הכיוון ומבחינת מקומו, מהותו, תרומתו וחשיבותו לאורגאניזם.

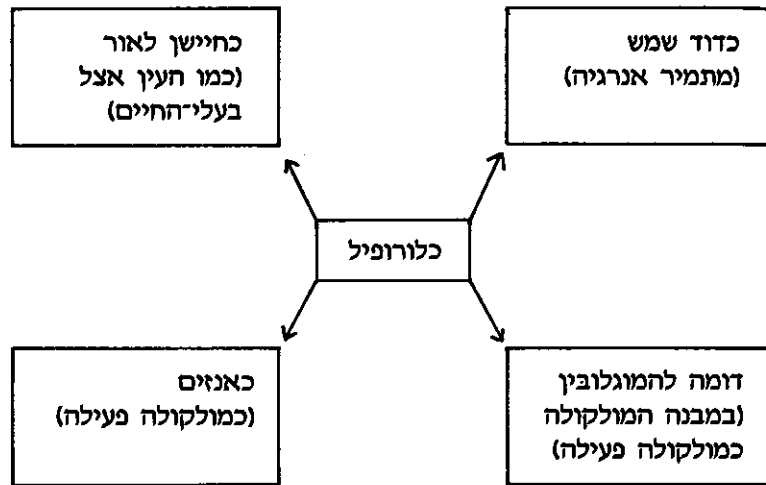
בהתחשב בבעיות שהועלו כאן, בהוראת הפוטוסינתזה אנחנו מציעות להתמקד, ואולי אף להתחיל - בריאקציית האור, משום שהיא הדבר המייחד את הפוטוסינתזה מתהליכים ביולוגיים אחרים. זאת משום שיש בו גיוס אנרגיה חיצונית שאינה אנרגיה כימית - גיוס של אנרגיית קרינה, אל תוך קשרים כימיים המתבטאים ביצירת ATP ו-NADPH, ואלו מובילים ליצירתו של חומר אורגאני.

אם נעסוק בהרחבה ובהדגשה בשלב האור, נדגיש את היותו של תהליך הפוטוסינתזה תהליך לוכד אנרגיה, בעוד יתר התהליכים הביולוגיים הם "מבזבזי" אנרגיה. האנרגיה הנלכדת בשלב זה מקיימת את צורכי האנרגיה של כמעט כל עולם החי. הכלורופיל (הצבען הירוק של הצמח) הוא החומר הלוכד את אנרגיית האור והופך אותה לאנרגיה כימית. (האינטראקציה של אור השמש עם מולקולות הפיגמנט - הכלורופיל, מעוררת אלקטרון של מולקולת הפיגמנט לרמת אנרגיה גבוהה יותר. כשאלקטרון "נופל" בחזרה לרמת אנרגיה נמוכה יותר, האנרגיה שהוא "מוותר" עליה מובילה ריאקציות כימיות כמו פירוק המים למימן וחמצן, ואלה מזורזות ומכוונות על-ידי אנזימים).

### 3. החתייחסות לכלורופיל

- המטרה - להביא את הלומדים לכך שיראו את הכלורופיל כמולקולה פעילה. הדבר כרוך בהשתחררות משני קשיים:
1. התפיסה החזותית היום-יומית של הכלורופיל כמשטח ירוק רציף, המרגיע את העין.
  2. ראייתו כפאסיבי, בגלל היותו חלק מן הצמח.

לשם השגת המטרה, רצוי לנסות להסתכל בכלורופיל מנקודות מבט שונות, מתוך תקווה שבדרך זו נגביר את המוטיבאציה, העניין וההבנה של הנושא:



לדוגמה: כאן נפרט את מרכיבי האנאלוגיה של הכלורופיל כחישן. נשתמש באנאלוגיה ככלי דידיאקטי: בחרנו להרחיב במסגרת זו באנאלוגיה של "הכלורופיל כחישן", משום שבאמצעותה אפשר להבליט את קווי הדמיון לבעלי-חיים ואת היות הצמח אורגאניזם פעיל. בטיפול הדידיאקטי חשוב להדגיש את מרכיבי הדמיון ואת מרכיבי השוני בין המיוצג (הכלורופיל) ובין האנאלוגיה (חישן).

חדומה לחישן (כמו העין)

\* הקשר בין הסביבה והאורגאניזם (עיקרון ביולוגי שווה בצמח ובעלי-

החיים) בצמח באמצעות הכלורופיל, ובעל־החיים באמצעות חיישן, כמו העין.

- \* התמרה לצורת אנרגיה אחרת - כימית.
- \* קליטת אנרגיית אור ספציפית מבחינת אורך גל (דמיון בסוג הפעולה).
- \* לצורך הגנה. עודף קרינה עלול להיות הרסני: בקשתית העין יש פיגמנטים מגינים, ועל הכלורופיל מגינים פיגמנטי עזר.
- \* יש סף שרק מעליו מתחילה פעילות (מבחינת עוצמת האור).
- \* חוסר יציבות זמנית - חייב להיות זמן מנוחה לצורך חידוש פעילות.

### השונה מחיישן

- \* בפוטוסינתזה, קליטת האנרגיה מן הסביבה היא לצורך הזנה. בבעלי־החיים - לצורך איפורמאציה (למשל, תמונה המתקבלת מחסביבה).
- \* דרך החיישן הגירוי עובר לתאי עצב. ראיית התמונה מתקבלת במוח ולא בעין; הכלורופיל פועל במקום שהוא נמצא בו.
- \* התגובה של הצמח לאור נחשבת לסבילה, ואילו בבעל־החיים היא נחשבת לפעילה.
- \* חיישן הוא תא או קבוצת תאים, ואילו הכלורופיל הוא חומר.
- \* הכלורופיל קולט שני אורכי גל משני צדי הסקאלה של האור הנראה. ברווח ישנו האור הירוק. מבחינת החיישן - תאים ספציפיים קולטים אורך גל ספציפי, וחומר מסוים קולט אורך גל אחד בלבד, ואם יותר, אזי בלא פערים, בספקטרום.

### סיכום

בהוראה של נושא מורכב כל־כך כמו הפוטוסינתזה קיים פיתוי לעקוף את הקושי; למשל: ללמד את הנושא מתוך היבט חומרי של התהליך ולא מן ההיבט האנרגטי, שהוא קשה ומופשט. לעתים משאירים את הקושי בלא הבהרה, מתוך תקווה שהאינטואיציה ונסיון החיים יסייעו להתגבר עליו.

גישתנו: העמדת הקושי במרכז הטיפול הדידאקטי. לדעתנו, אם ברצוננו שהתלמיד יבין את המושג במשמעותו המדעית, עלינו, קודם כל, לחשוף את התפיסות השגויות, להראות לתלמיד את הקשר שבין תפיסותיו לנסיון החיים שלו, ולעמת ולהשוות את תפיסותיו עם התפיסה המדעית.

הוראה נכונה של מדע נובעת מן ההכרה שמדע מתחיל במקום שבו החושים אינם מספיקים להכרה אובייקטיבית של המציאות. המדע נזקק למדידות, להסקים לוגיים ולפרשנות הגיונית.

לשם השגת מטרות אלו אנחנו מציעות את האמצעים הדידאקטיים שפירטנו קודם לכן.