

ב"אינטל" וב"מיקרון" חושבים כימיה מחוץ לקובייה...

תמי לוי נחום*



נירית גרושקו ב"קובייה" שלה

יושבים, חושבים ועובדים בקובייה. את קירות הקובייה של נירית מעטרת תמונות משפחתה... הטבלה המחזורית.

"אז למה כימיה, בעצם?" אני שואלת.

"כתלמידת תיכון, אחרי שטעמתי כימיה בכיתה יו"ד, בחרתי ללמוד כימיה 5 יח"ל. אחת הסיבות הייתה שבכימיה אין נוסחאות פלא שפותרות את הסוגיות הסבוכות, אלא נדרשת סקרנות וחשיבה מדעית, שבאה לידי ביטוי במיטבה בתהליכי הלמידה של תגובות כימיות. אני נזכרת שבמעבדות ובניסויים תמיד צצו התופעות של ה"יצא מהכלל"... וזה מה שריתק אותי. המקרים ה"מפתיעים" שצריך להבין ולהסביר. המגנונים המעניינים. לימודי הכימיה עוררו בי השראה.

כשסיימתי תיכון, המשכתי בלימודי עתודה לקראת תואר ראשון בהנדסה כימית, בטכניון בחיפה. אחרי שירותי הצבאי, שעסק גם הוא בכימיה (בחינת השמנים, הדלקים והדטרגנטים שהצבא רוכש ובוחן את איכותם במעבדות אנליטיות ואורגניות), החלטתי ללמוד כימיה בתיכון."

דצמבר 2010. הגעתי לאזור התעשייה בקריית גת, לקומפלקס שבו שני בנייני הייטק ועליהם מתנוססים שלטי Intel ו-Micron. נסעתי לפגוש את **נירית גרושקו**, מנהלת מחלקת ההנדסה, במפעל הנחשב למוביל בעולם בייצור זכרונות ועוסק באופן בלעדי בייצור מאסיבי של שבבי זיכרון הבזק.

נירית (42), נשואה לעמנואל, ואמא לאורי (17), עמית (14) ויואב (8) פלוס 3 כלבים, דגים, צבים, איגואנה, נחשים, ומה לא... מתגוררת במושב שדמה, בבית כפרי בין פרדסים ושדות.

נירית למדה בבית הספר התיכון "הגמנסיה הראלית" בראשון לציון ובכיתה י"א בחרה ללמוד כימיה כמקצוע ראשי אצל משה זמיר. כעשור מאוחר יותר לימדה כימיה בגימנסיה, והפעם הנחה אותה זמיר כרכז מגמת הכימיה והעביר לה את משנתו הפדגוגית-חינוכית, את כל הכימיה שהוא לימד באהבה גדולה ואת כל הטיפים שעשויים להביא להצלחת התלמידים בבחינת הבגרות בכימיה.

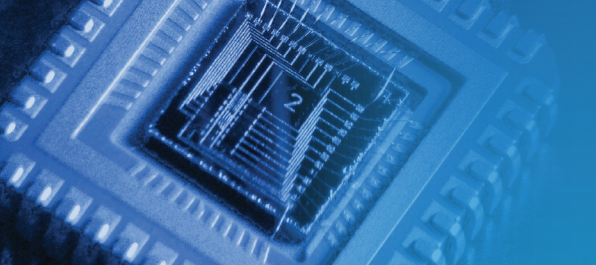
כ-4 שנים מאוחר יותר מתחילה נירית לעבוד בחברת אינטל כמהנדסת תהליך.

אחרי בדיקות קפדניות בשער המתחם, אני נכנסת ללובי הבניין ומקבלת תג "visitor". נירית מקבלת את פניי, והסירור במפעל מתחיל.

"עד היום אני מתגעגעת לאותו רגע קסום שבו דלת הכיתה נסגרה, והכיתה - שלי!" מספרת נירית. "האינטראקציה עם התלמידים גרמה לי סיפוק רב. אהבתי ללמד כימיה, להפתיע את התלמידים עם ניסויים, לסקרן אותם, לחקור ולפתור בעיות יחד אתם."

אנחנו נכנסות ל-open space, חלל שמחולק לקוביות. בכל קובייה עובד אדם אחד, ובה כיסא, שולחן ומחשב. אני מגלה, להפתעתי, שכולם - כולל המנכ"ל - יושבים בקוביות כאלה. פה אין "לשכת המנכ"ל". מהטכנאי ועד מנכ"ל המפעל - כולם

* ד"ר תמי לוי נחום, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.



על מפעל Fab12

המפעל שבו עובדת נירית מזה 11 שנים, החל לייצר בשנת 1998 (כמפעל של אינטל) בטכנולוגיית לוג'יק 180 ננומטר ועבר לייצור של זיכרונות פלאש 90 ננומטר, 65 ננומטר, ובקרוב יחל ייצור מאסיבי של מוצרים בטכנולוגיית 45 ננומטר.

"המפעל עוסק בייצור מוצרי זיכרון בתחום המחשוב, הטלפונים הסלולריים ועוד. זהו מפעל ייצור לכל דבר. הייצור נעשה בתנאים של "חדר נקי". החדר הנקי הוא לב המפעל".

"החדר הנקי"

"נקי – זה אומר שדרגת הניקיון בו גבוהה פי 10,000 מחדר ניתוח. כל גרגר אבק הוא מזק בלתי הפיך לתהליך הייצור. בחדר הנקי עובדים טכנאים: טכנאי הפעלה ותהליך וטכנאי ציוד. טכנאי ההפעלה והתהליך משנעים את פרוסות הסיליקון, מריצים פרוסות מבחן במכונות השונות על מנת לבדוק את נקודת העבודה של המכונה וכן מודדים ובודקים את פרוסות הסיליקון כדי לוודא שהייצור נעשה על פי הספציפיקציות. הם מגיבים לתקלות ובעיות בקו וכמובן לוקחים חלק בניסויים ההנדסיים. טכנאי ציוד אחראי על תחזוק המכונות המתוכננות, מה שנקרא תחזוקה מונעת וכן על טיפול בתקלות ושיפורים שמתבצעים על הכלים עצמם".

המהנדסים אינם המנהלים של הטכנאים, אך הם הגוף והסמכות המקצועית שלהם. המהנדס נמצא בחדר הנקי מס' שעות ביום, כ-30% מזמנו.



טכנאי הפעלה בחדר הנקי

אנחנו יוצאות לשיטוט במפעל ומתקדמות לעבר המקום המרכזי ביותר שלו, החדר הנקי, המקום שבו מייצרים את השבבים (ראו תמונה).

"אחרי ארבע שנות הוראה עשיתי שינוי. ב-1999 התקבלתי לעבודה באינטל כמהנדסת תהליך במחלקת הנדסה באזור האיכול הרטוב, wet etch (ראו מסגרת על שלבי עיבוד הסיליקון). עברתי הדרכות והכשרות מרתקות. זה עולם אחר. מהנדס התהליך אחראי על מספר שלבים בתהליך הייצור המתבצעים במכונה או במכונות מסוימות בחדר הנקי. האחריות היא על איכות התהליך, על ההדירות שלו וכמובן על הובלת שיפורים באופן רציף על מנת לשפר את תנובת הקו ולהוריד עלויות".

הגענו ללב המפעל. התצפית במסדרון ההיקפי לחדר הנקי מאפשרת הצצה נדירה לאולם ייצור, שמצויות בו מכונות במיליוני דולרים שמייצרות שבבים בתהליכים ננומטריים. דרך חלונות הזכוכית צפיתי בטכנאים המטפלים בפרוסות הסיליקון. הטכנאים לבושים בחליפות מיוחדות, המכסות את הגוף כולו למעט העיניים שמוגנות במשקפי בטיחות, וכל זאת על מנת לשמור על רמת הניקיון המחמירה (פי 10,000 מחדר ניתוח).

"במסגרת תפקידי כמהנדסת תהליך נשלחתי עם משפחתי לשלושה חודשים לעמק הסיליקון שבסן פרנסיסקו, למפעל הפיתוח של אינטל, במטרה שאשתתי בתהליכי המחקר והפיתוח (R&D) לקראת הבאתה של הטכנולוגיה החדשה שפותחה שם – למפעל בארץ".

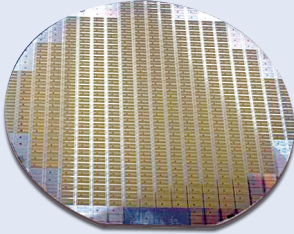
מי יכול להתקבל כמהנדס במפעל מיקרו-אלקטרוניקה?

"כל מי שיש לו סקרנות טכנולוגית, חשיבה יצירתית, יכולת למידה גבוהה ויכולת טובה לעבוד בצוות בשילוב עם תואר אקדמי רלוונטי, כלומר, בוגר תואר ראשון בכימיה, בהנדסת כימיה, בהנדסת חומרים ובכלל במקצועות ההנדסה – יהיה מועמד ראוי".

האם המפעל שייך כיום לאינטל?

המפעל היה בבעלות אינטל במשך 9 מתוך 11 שנות עבודתי בו. לפני כשנתיים עבר לבעלות חברת "נומוניקס" ולאחרונה נרכש על-ידי חברת "מיקרון". השינויים המרכזיים שקרו הם שינויים "רכים" שקשורים לתרבות הארגונית כיוון שהמבנה, האנשים והטכנולוגיה נשארו כפי שהיו...".

מסכת העינויים שעוברת פרוסת הסיליקון



פרוסת סיליקון מעובדת, שקוטרה כ- 20 ס"מ. על פרוסה זו ניתן ליצור בין 100-300 שבבי מחשב

תהליך הייצור של מעבד אלקטרוני כולל כ-200 פעולות שונות שכל אחת מהן חייבת להתבצע בתנאי ניקיון קיצוניים ובתיאום מלא, הן עם פעולות קודמות והן עם פעולות עתידיות. בין השאר עוברת פרוסת הסיליקון תהליכי חמצון, שיקוע, ליטוגרפיה, מטאליזציה, השתלה, הרפיה, איכול ובונדינג (הלחמה), כל פעולה כזו מתבצעת מספר פעמים.

שלב החמצון הראשוני נעשה בטמפרטורה של 800 מעלות צלסיוס ובו נוצרת שכבת תחמוצת דקה (SiO_2) שאינה מוליכה חשמל (כמו כל התחמוצות בעולם) ומתפקדת כמבודדת בין השכבות המוליכות, הנבנות זו על גבי זו.

בשלב הליטוגרפיה מוטבעים קווי המעגלים החשמליים בתהליך אופטי הדומה להקרנת לחות דפוס.

שלב המטאליזציה הוא בעיקרו שיקוע של מתכות כמו אלומיניום (והיום גם נחושת) המותזות בשכבות דקות כדי לשמש להולכת הזרם בין הטרנזיסטורים השונים במעבד.

מטרת ה"השתלה" (Implant), שבמסגרתה מופצצת פרוסת הסיליקון ביונים של גזים שונים במתח שמגיע ל-150 אלף וולט, היא לשנות את כושר ההולכה החשמלית של הפרוסה בצורה נקודתית. היונים "מזהמים" את הסיליקון הטהור וקובעים בו חומרים זרים שתפקידם לשנות את מקדם ההולכה החשמלית בנקודות ספציפיות (תהליך זה נקרא אילוח).

אחר כך מגיעה ה"הרפיה", שבמסגרתה מחלים הגביש המעונה, שנהפך בינתיים לאמורפי. התהליך מתבצע באמצעות מנוחות הלוגניות שמחממות את הסיליקון לטמפרטורה של מעל אלף מעלות במעין הבזק זריז וחד פעמי.

בתום ההרפיה מתבצעים ה"איכולים" שמשמעותם פתיחת חורים בתחמוצת המבודדת בנקודת שונות כדי להחדיר את החיט. הכל זעיר, מסובך וסטריילי לאין שיעור (מבלי להזכיר את ה"בונדינג" - תהליך הלחמת הרגליים המתכתיות, שנותנות לשבב את צורת הג'וק האופיינית).

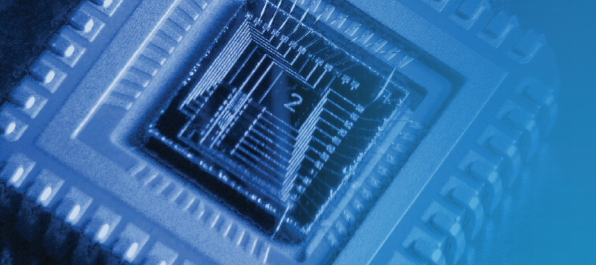
הקטע לקוח מתוך "כימיה במנהרת הזמן", המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

התחלת כמהנדסת תהליך והיום את מנהלת המחלקה?

"כשנה לאחר שעבדתי כמהנדסת תהליך, קודמתי לתפקיד מנהלת אזור בחדר הנקי, עבודת משמרות שכללה ניהול של טכנאים, אחריות על תחזוקת הציוד ורצף ייצור איכותי; בהמשך קודמתי לנהל מספר אזורים (ניהול מטריצוני של משימות ואנשים). התפקיד כלל יצירת מצוינות באזורים שמהווים צוואר בקבוק בתהליך הייצור, ע"י הטמעת נהלים אחידים ושיפור יכולות טכנולוגיות, תהליכיות ושיפור עלויות. לאחר כשלוש שנים בתפקיד קודמתי לניהול במחלקת הנדסה, שם עשיתי שני תפקידים: ניהול ה-wet etch וניהול ה-implant. כיום אני מנהלת את מחלקת הנדסה יחד עם שותפי יפת בנימין. במסגרת תפקידי הנוכחי אני אחראית על כל ההיבטים הטכנולוגיים של ייצור הזיכרונות במפעל, וכן על תחזוקת הציוד בחדר הנקי מההיבט ההנדסי. המחלקה כוללת כ-120 מהנדסים (בעלי תואר ראשון, שני ושלישי) בתחומי המדעים המדויקים וההנדסות השונות וכן עשרות סטודנטים בלימודי תואר ראשון ושני במדעים ובהנדסה".

"סביב החדר הנקי/מחלקת הייצור עובדות מספר מחלקות: מחלקת הנדסה, מחלקת מחקר ופיתוח R&D, מחלקת התנובה ועוד. מחלקת הנדסה מונה כ-120 מהנדסים ואחראית על תהליכי הייצור, על אפיון התחזוקה של הציוד, על שיפור עלויות הייצור, על שיפור התפוקה מכל יחידה בחדר הנקי ועל שיפורים המביאים לעלייה בתנובת הקו. מחלקת ה-R&D מפתחת את הטכנולוגיות העתידיות שירוצו במפעל, ומחלקת התנובה (Yield) אחראית על איתור דפקטים (פגמים), על בעיות איכות, על ניתוח הנתונים של המוצר בסוף הקו ועל פתרון בעיות אינטגרטיביות הצצות מפעם לפעם בקו הייצור".

אני מרותקת לעבודה המתרחשת בחדר הנקי... לנגד עיניי פרוסות הסיליקון עוברות טבילה בתמיסות שונות, עוברות לייבוש... מועברות על ידי הטכנאים או באופן אוטומטי ממכונה למכונה.



מעבדת הכימיה במפעל

יש מעבדה במפעל?

"כיוון שכל התהליכים שעוברת פרוסת הסיליקון (ראו מסגרת) הם תהליכים כימיים, שבהם מעורבים, למשל, חומצות ובסיסים, בופרים, תהליכי אילוח, תהליכי דפוזיציה והשטחה (planar), ישנו צורך לבדוק את ההרכב של התמיסות, רמת המזהמים, סוג המזהם, אבחון תקלות שמתרחשות ברמה הננומטרית בתהליך הייצור ועוד. ישנן מספר מעבדות, ביניהן מעבדה אנליטית שבה מבצעים אנליזות על דגימות מהחדר הנקי".

מי עובד במעבדה?

"עובדים בה בעלי תואר שני ומעלה בכימיה ובמדעים מדויקים אחרים. במעבדה – המכשירים לאיתור זיהוי זיהומים הם המיקרוסקופים האנליטיים מסוג EDS (Energy-dispersive scanning electron X-ray spectroscopy) ומסוג SEM (scanning electron microscope) (ראו מסגרת משמאל).

"חושבים כימיה"

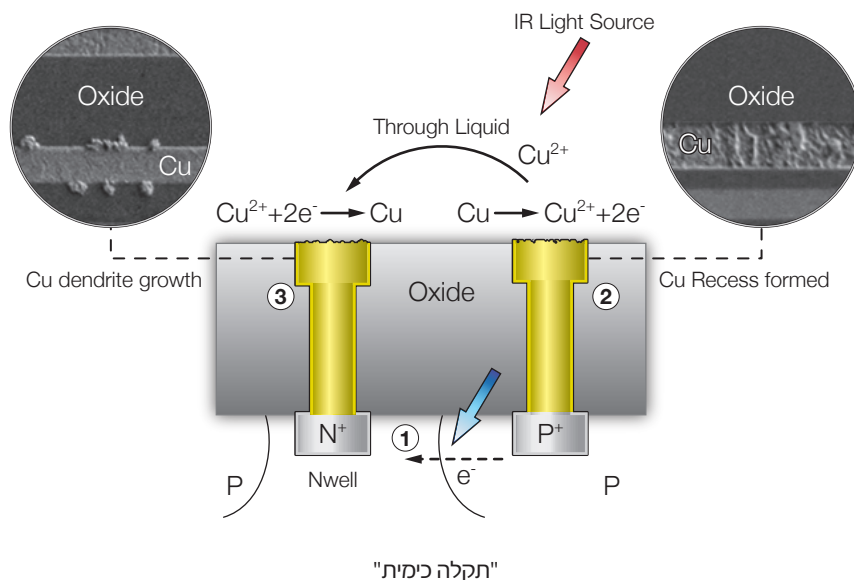
אילו תקלות כימיות עלולות לקרות ומה עושים?

"הייתה לנו בעיה עם מכונה בחדר הנקי, כשבמהלך שינוע הפרוסה במכונה היא הפילה את הפרוסות; כדי לאתר את מקור הבעיה הצבנו מצלמת IR (אינפרא אדום) שתתעד את התהליך. לאחר הצבת המצלמה נצפתה "תקלה כימית" חדשה. הסתבר

מיקרוסקופ ה-EDS הוא ספקטרוסקופי והוא משמש לזיהוי היסודות ולאפיין הכימי של מדגם נתון. הטכנולוגיה מבוססת על האינטראקציה של קרני X (קרינה אלקטרומגנטית) עם חומר. בתהליך הספקטרומטריה מקרינים את החומר הנבדק בקרני רנטגן; החומר קולט חלק מהקרינה ופולט חלק אחר שאותו מנתח גלאי. האינטראקציה עם קרני הרנטגן תהיה שונה עם היסודות השונים עקב המבנה האטומי השונה של כל יסוד, כך שניתן לנתח ולזהות את "טביעת האצבע" הייחודית של היסוד בספקטרום המתקבל. הגלאי שולח את ממצאיו למעבד, אשר מתרגם את התוצאות לצורה גרפית.

מיקרוסקופ ה-SEM הוא סוג של מיקרוסקופ אלקטרוני. זהו מיקרוסקופ המסוגל להגדיל עצמים קטנים במיוחד בכושר הפרדה גבוה על ידי שימוש באלקטרונים, כתחליף למקור אור במיקרוסקופים רגילים. מיקרוסקופ אלקטרוני מסוגל להגדיל את העצם הנבחן עד לפי 1,000,000 מגודלו המקורי. מקבלים דימות של מבנה המדגם שאותו ניתן לנתח ולחקור.

שקרינת האינפרא אדום שנפלטה מהמצלמה הביאה ליינון של אטומי הנחושת בפס הנחושת (ראו איור "תקלה כימית"), כך שנצפו "חורים" במתכת, ובפס המתכת הסמוך נוצרו "גידולים" – יוני נחושת שעברו דרך התמיסה, קלטו אלקטרונים מהסיליקון והפכו לגבישי נחושת שהצטברו על פס הנחושת השני. למעשה, הניסיון לפתור תקלה אחת יצר בעיה חדשה, בלתי צפויה".



תני לי דוגמה לשאלה.

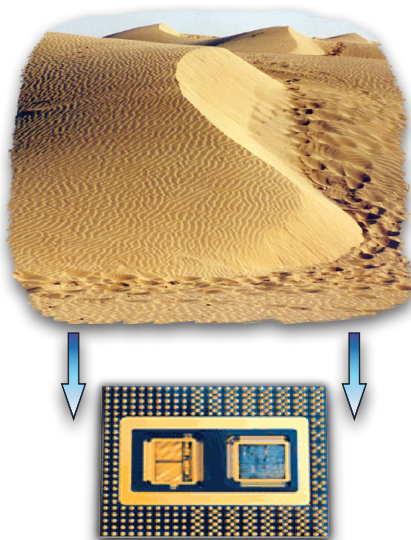
"אתן לך דוגמה: בכלי אטום ומבודד מונחת טבעת העשויה מתכת. מחממים את הטבעת לטמפרטורות גבוהות. מה לדעתך יקרה לגודלם של הרדיוסים, הרדיוס הפנימי והרדיוס החיצוני של הטבעת? אני מבקשת שיתארו את השינוי שיתרחש תוך כדי החימום. תשובה כמו "לא יקרה דבר לגודל הרדיוסים, והמתכת פשוט תתפורר", או "שני הרדיוסים יגדלו" – אם יתלווה לתשובה השגויה מודל מעניין, זה גם יכול לספק. התשובה היא כמובן שהרדיוסים משתנים, הפנימי קטן והחיצוני גדל. אך לא מעניין אותי לקבל "תשובה נכונה", אלא מעניינת אותי החשיבה...

דוגמה נוספת: לפניך שני מוטות, מוט ברזל ומוט מגנט. כיצד תזהי מה הוא מה? אין בידיך כל אמצעי נוסף, ושכירת המוטות אסורה.

שוב, גם במקרה הזה, אני לא מחפשת תשובה נכונה, אלא ללמוד על דרך החשיבה. איך המועמד ניגש לבעיה, איזה פרמטרים עולים כעשויים לעזור בפתרון הבעיה וכדומה..."

ולבסוף, "איך אשכנע תלמידים ללמוד כימיה בתיכון?"

בעיניי הכימיה נמצאת בלב החיים שלנו. היא הבסיס לחיים ולסובב אותם, כימיה קשורה לכל דבר שאנו עושים או שקורה סביבנו. היא מספקת בסיס טוב והסברים בתחומי הרפואה, ההייטק, הביולוגיה המולקולרית, טכנולוגיית מזון... אסביר להם שהיא לא רק מרתקת אלא גם הכרחית להבנה של תהליכים רבים שרלוונטיים כמעט לכל תחום שיבחרו לעסוק בו בעתיד."



"תקלה כימית אחרת הייתה במכונה שבה מתרחשת דפוזיציה (ריבוע, השקעה) של שכבת בידוד על פרוסת הסיליקון, על ידי תגובה של גזים המוזנים מעל המשטח. הגזים מגיבים ביניהם לקבלת השכבה הרצויה הנבנית על גבי הפרוסה והאמורה לבדד. תקלה שהתמודדנו איתה לאחרונה הייתה לאתר את המקור של קצר חשמלי שנצפה בפונקציונליות של הרכיבים בסוף תהליך הייצור. חקר התקלה הביא למסקנה שהשכבה המבודדת הוליכה כיוון שחלק ממנה הכיל סיליקון מועשר שלא עבר חמצון. הסתבר שהיחס הסטויכיומטרי בין הגזים שהוכנסו לתא התהליך לא היה מדויק, ולמעשה, התהליך התבצע בקצה חלון העבודה הרצוי לתגובה. היחס הלא מדויק בין המגיבים יצר תוצר (שכבה) עם תכונות דיאלקטריות שונות מהרצוי, שיצרו הולכה בפס המבודד שהביאה לקצר החשמלי..."

מהן התכונות החשובות לך בעובד?

"כשאני מראיינת מועמד או מועמדת אני מחפשת סקרנות ואינטואיציה טכנולוגית, יצירתיות, אדם בעל הנעה עצמית, שיהיה לו דרייב, שתהיה לו היכולת ליזום ומאוד חשוב: עובד שיכול, רוצה ומסוגל לעבוד בצוות. העבודה כאן היא לא יחידנית. ו"עבודת צוות" היא לא סיסמה אצלנו. היא מרכז העשייה. עובדים כאן יחד, בשיתוף פעולה. אי אפשר אחרת. אנו משקיעים בעובדים שלנו באופן אינטנסיבי בהכשרות, בהדרכות ובקורסים שחלקם פותחו אצלנו, וחלקם – אצל ספקים חיצוניים. אנחנו עובדים עם מודלים מאוד מקצועיים להכשרת עובדים."

מה תשאל מועמד לעבודה?

"מבחינתי, יצר הסקרנות והלמידה לעומק חייב להימצא אצל מי שרוצה לעבוד איתנו. לכן בריאיון עבודה אני שואלת את המועמד מה מעניין אותו ושואלת אותו על כך. המטרה היא לא להתקיל באיזה נושא שמעניין אותי ולשאול עליו, אלא לברר, אם בתחום שבו הוא מתעניין, הוא אכן מגלה הבנה ועומק, ואם כן, אוכל להסיק שכשמשוהו מסקרן אותו, יש לו היכולת להעמיק בו. היכולת הזו חשובה מאוד והיא לא טריוויאלית. בשלב מסוים בריאיון אני מבקשת מהמועמד שיספר על משהו שעשה בחייו, שהוא משמעותי עבורו, ולומדת מה משמעותי בעיניו, איזה תחום מעניין אותו וכו'. במהלך הריאיון אני מעלה שאלות מאתגרות כדי ללמוד על אופן החשיבה של המועמד."