

העתקת אנדרטת "נזכור" בירושלים - הכימיה שמאחורי פרויקט הנדסי מיוחד

רון בלונדר*

נושאים בכימיה: כימיה של פולימרים, כימיה אנליטית, חומצה-בסיס, רדיואקטיביות ועוד.

במסגרת עיסוקו בהנדסה אזרחית קיבל בעלי פרויקט הנדסי מיוחד - העתקת אנדרטת "נזכור" מרחבת בנייני האומה בירושלים והעברתה למיקום חדש, ליד בית המשפט העליון. זאת משום שבשטח האנדרטה תוכננה חציבת הכניסה למנהרה עמוקה שתוביל לרכבת המהירה בין ירושלים לתל-אביב. לאנדרטה ערך רגשי רב, ולכן היה צורך להעבירה בשלמותה למקומה החדש.

הפרויקט ההנדסי להעתקת האנדרטה כלל כמה שלבים המבוססים על תגובות כימיות, אך טמן בתוכו גם תעלומה מסתורית שהועלתה בשיחה של ערב שבת, ונפתרה במעבדות הכימיה באוניברסיטה העברית בירושלים. חשוב לציין בהקשר זה כי באותה התקופה ניהלתי את מעבדות בלמונטה.

נתונים

האנדרטה הנה עמוד אבן שהוצב במקום בשנת 1969 לזכר הנופלים על הגנת העיר ירושלים. משקל עמוד האבן: 120 טון, גובה האבן: 12 מ', מצב האבן: מתפורר ומכיל סדקים רבים, תכניות ההקמה והבנייה של האנדרטה: נעלמו.

שלב ראשון: מילוי הסדקים

עמוד האבן הכיל סדקים רבים, ומשום כך היה חשש כבד, שבמהלך מבצע העתקת האנדרטה, תישבר האבן. כאמור, לאנדרטה ערך רגשי רב, ומטרת הפרויקט הייתה להעביר את העמוד בשלמותו. כדי למנוע אפשרות של שבירה.

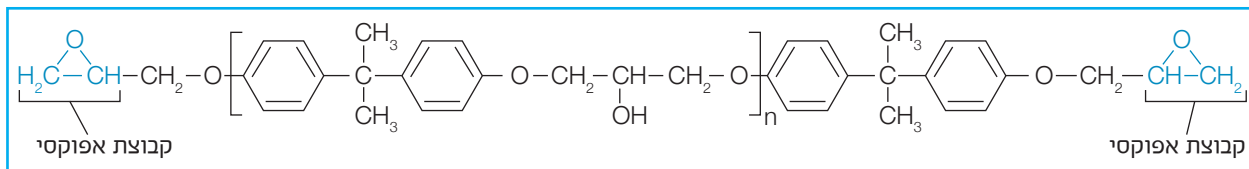
מה הקשר בין פרויקט הנדסי ובין כימיה? - אתן בוודאי שואלות (ושואלים) את עצמכן. ובכן, לפניכן סיפור על פרויקט הנדסי שתחילתו בשיחה בארוחת ערב שבת, וסיומו בתעלומה שנפתרה במעבדות הכימיה של האוניברסיטה העברית בירושלים.

הקדמה

בתחילת שנות ה-70 התחילה להתפתח הגישה ללימוד מדעים בתוך קונטקסט¹ (הקשר). הגישה להוראת המדע בקונטקסט באה לידי ביטוי במספר שיטות כמו: למידה דרך פרויקטים ולימוד בגישת החקר. הרעיון המרכזי הוא להפוך את לימודי המדעים למשמעותיים עבור הלומדים. הגישה ללימוד הכימיה בתוך קונטקסט מהווה בסיס חשוב בתכנית הלימודים החדשה בארץ. למידה זו מאופיינת בכמה עקרונות:

1. בהרכבת תכנית הלימודים נבחרים נושאים סביב קונטקסט מייצג, כתחליף לכתיבת תכנית הלימודים סביב תכנים בכימיה.
 2. הקונטקסט הנבחר צריך לאפשר הבניית הנלמד בשיעורי הכימיה יחד עם הידע הקודם של התלמידים (קונסטרוקטיביזם).
 3. לימוד בקונטקסט מאפשר העברה של הנלמד מסיטואציה אחת לסיטואציות אחרות, שהמשותף להן הוא הכימיה או ההיגיון המדעי.
 4. הקונטקסט צריך להיות רלוונטי ללומדים.
- במאמר זה אביא דוגמה ללמידה משמעותית בקונטקסט, שהתקיימה בסיטואציית אמת. הלימוד שהתקיים כלל תהליך של חקר, שאליו התלווה לימוד בתחום הכימיה של הבניין. כפי שתוכלו לקרוא, הלימוד כולל מספר

* ד"ר רון בלונדר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות. עד ליוני 2006 הייתה מנהלת מעבדות בלמונטה בירושלים. צילום העתקת האנדרטה נעשה על ידי שימי נכטיילר. תמונת גוש המתכת צולמה על ידי ד"ר דוד דרום.



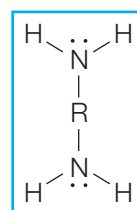
איור 1: פולימר דיאפוקסי

הפולימר בעל שתי קבוצות האפוקסי בצדדיו מכונה pre-polymer ויכול לנוע בגודלו בין $n=1$ עד $n=25$. למרות שאיננו יודעים מהו החומר שבו השתמשו בפרויקט העתקת האנדרטה (השמות המסחריים מטשטשים את ההרכבים הכימיים המדויקים כדי להגן בפני חיקויים ו"גניבות" של פטנטים), ניתן לשער שהיה זה פולימר שבו n אינו גבוה, כיוון שהחומר היה נוזל בטמפרטורת החדר.

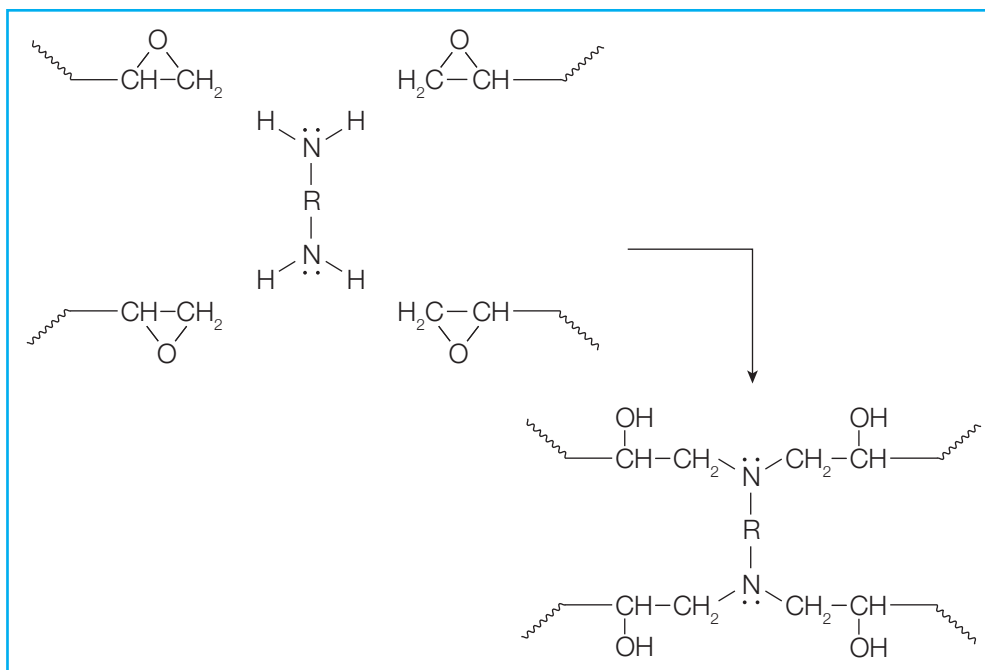
כאשר מערבבים דיאפוקסי עם דיאמין, יוצאת לפועל תגובת צילוב, ומתקבל חומר פולימרי מצולב בעל משקל מולקולרי גבוה. התוצר המתקבל הנו חומר חזק ביותר, שאינו ניתן לעיבוד. החומר מתקבל על ידי התגובה המתוארת באיור מס' 3.

לשם כך נדרש חומר גמיש, בעל יכולת "הידבקות", חומר שמתחיל את חייו כנוזל – כדי שיוכל לחדור לתוך סדקים קטנים ויקבל את צורתם – ומסיימם כמוצק.

דבקים אפוקסיים² הם העונים על דרישות אלה. מהו דבק אפוקסי, ומהי הכימיה שמסבירה את פעולתו? דבק אפוקסי הוא פולימר מצולב הנוצר על ידי ערבוב של שני חומרים: האחד פולימר בעל משקל מולקולרי נמוך בעל קבוצות אפוקסי בשני קצותיו (איור מס' 1), והחומר השני, המצלב, הנו די-אמין (איור מס' 2).

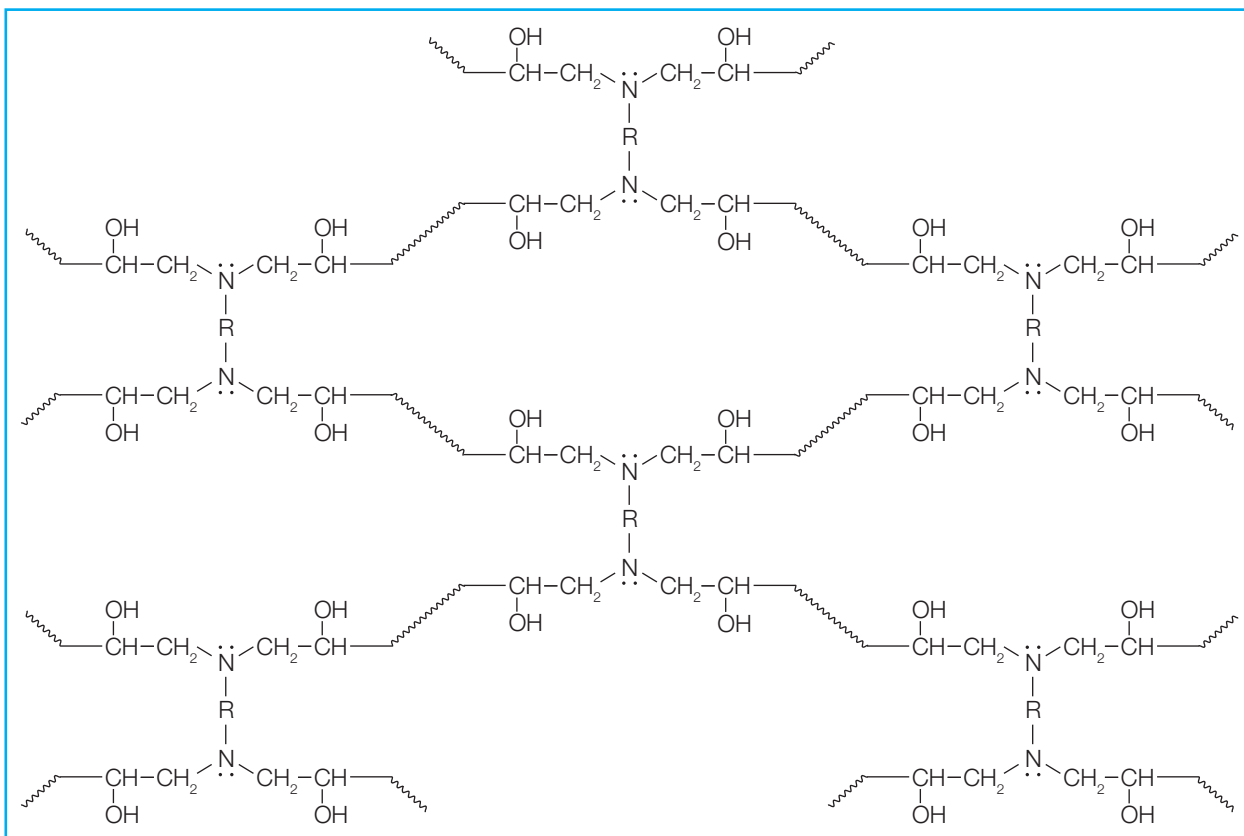


איור 2: דיאמין, חומר מצלב ליצירת הדבק האפוקסי



איור 3: תגובת הצילוב לקבלת דבק האפוקסי

לפיכך החומר המתקבל מתאים למילוי הסדקים באנדרטה; בזמן שלפני התגובה שני המגיבים (נוזלים בטמפרטורת החדר) נכנסים לתוך הסדקים והחריצים שבאבן, ממלאים אותם, ולאחר זמן קצר של שעה הפולימר הופך למוצק, ואת מלוא תכונותיו מקבל התוצר לאחר 24 שעות. כל מולקולות הדי-אמין וכל מולקולות הדיאפוקסי הופכות למולקולה ענקית אחת, כפי שניתן לראות באיור מס' 4.



איור 4: תגובת הצילוב לקבלת דבק אפוקסי עם המצלב הדיאמיני

כאשר שאלתי את אנשי הבנייה מה בדיוק קורה שם, קיבלתי תשובות שכללו את המילים: צמנט, מים והידרציה, מילים שרומזות על תגובה כימית. ואכן, מדובר בתגובה כימית. תחילה אפרט את מרכיבי הבטון ואחר כך נבחן מהי התגובה הכימית המעורבת בשינוי תכונותיו. ניתן לראות את מסגרות הבטון והברזל העוטפות את האנדרטה בתמונה מס' 5. התמונה גם עוזרת להתמצאות גאוגרפית – ניתן להבחין כי העמוד ניצב מול התחנה המרכזית בירושלים.

שלב שני: עטיפת העמוד במסגרת ברזל וקיבועה

בעזרת יציקות בטון

בשלב זה נעטף כל עמוד האבן בניילון נצמד, כדי לשמור על ניקיון האבן לפני הטיפול הבא שכלל: ריתוך מסגרת ברזל סביב העמוד וקיבוע המסגרת לאבן על ידי יציקת בטון. הבטון מהווה את אחד המרכיבים העיקריים של הבנייה בארץ. החומר מובל אל אתר הבנייה בתוך מערבלים כאשר הוא רך וגמיש, ולפיכך ניתן לעיבוד ומקבל את צורת התבנית שלתוכה יוצקים אותו. זמן קצר לאחר היציקה הבטון מתקשה ומתחזק מאוד.

מרכיבי הצמנט³

צמנט הוא שם האבקה היבשה שממנה מכינים את הבטון. צמנט פורטלנד הנו חומר מליטה הידרבלי, המתקבל על ידי קליית תערובת של חומרי גלם המכילה סיד (CaO), סיליקה (SiO₂), אלומינה (Al₂O₃) ותחמוצת ברזל בטמפרטורות גבוהות. בארץ משתמשים באבן הגיר כמקור לסיד ובאדמת חרסית כמקור הסיליקה והאלומינה. בחימום של 1450°C וכתוצאה מן הקלייה, מתקבל חומר הנקרא "קלינקר צמנטי", אשר נטחן לאבקה דקה עד לקבלת "צמנט פורטלנד".

בטבלה מספר 1 מוצג הרכבו הכימי של צמנט פורטלנד. ניתן לראות כי משקלם של הסיד, הסיליקה והאלומינה ותחמוצות הברזל מהווה כ-90% ממשקל הצמנט. אי לכך מכונות תחמוצות אלה בשם תחמוצות ראשיות.



תמונה מס' 5: אנדרטת "נזכור" מול התחנה המרכזית בירושלים, לאחר יציקת בטון אשר חיברה את מסגרות הברזל לעמוד.

שם החומר	אחוז משקלי	נוסחא כימית
Tricalcium silicate	50 %	Ca ₃ SiO ₅ or 3CaO • SiO ₂
Dicalcium silicate	25 %	Ca ₂ SiO ₄ or 2CaO • SiO ₂
Tricalcium aluminate	10 %	Ca ₃ Al ₂ O ₆ or 3CaO • Al ₂ O ₃
Tetracalcium aluminoferrite	10 %	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀ or 4CaO • Al ₂ O ₃ • Fe ₂ O ₃
Gypsum	5 %	CaSO ₄ • 2H ₂ O

טבלה מס' 1: החומרים המרכיבים את הצמנט והאחוז המשקלי שלהם.

התקשרות הצמנט והתקשותו³

כאשר מוסיפים מים לצמנט, מתקבלת עיסה פלסטית הניתנת לעיבוד ולעיצוב. תכונות אלה של העיסה נשמרות במשך כשעה, ובסופה מתחיל זמן ההיקשרות, שבו העיסה מסמיכה עד אשר היא הופכת למוצק קשיח. תהליך היקשרות והתקשות הצמנט הם תוצאה של תהליך הידרציה של מרכיבי הצמנט. במגע עם מים עוברים מרכיבי הצמנט הראשיים תגובה של הידרציה, שכתוצאה ממנה מתקבלים הידרטים שונים, שהעיקרי שבהם הוא "סיד כבוי" - Ca(OH)₂; התגובה מתוארת במשוואה מס' 1.



משוואה מס' 1: תהליך ההידרציה, המתרחש כאשר מערבבים צמנט עם מים.



תמונה מס' 6: גוש המתכת "המסתורית" שהתקבלה על ידי קידוחי ניסיון בתחתית העמוד.

זיהוי המתכת – אנליזה של מסג

קיבלנו דגימה של המתכת (הדגימה מוצגת בתמונה 6) והתחלנו לעבוד, כדי לזהות את המתכת ולמצוא פתרון לבעיה שהציבה המתכת המסתורית.

אתאר בקצרה את מהלך הבדיקות שביצענו על מנת לזהות את המתכת.

בדיקה ראשונה – בדיקה רדיואקטיביות. דוגמת המתכת שקיבלנו נראתה לנו כמתכת "כבדה", ולפיכך החלטנו להתחיל בבדיקת רדיואקטיביות, כדי לוודא שהחומר שקיבלנו אינו פולט קרינה רדיואקטיבית. השתמשנו במונה גייגר וקיבלנו תוצאה שלילית – כלומר, המתכת אינה פולטת קרינה רדיואקטיבית.

לפיכך התחלנו בתהליך הזיהוי שבדק תחילה את התכונות הפיזיקליות של המתכת: זוהי מתכת בצבע כסוף, פני השטח שלה שחורים, נקודות חלודה (אדומה) מפוזרות על פני השטח, המתכת רכה – ניתן לחרוץ אותה בקלות. בשלב הזה כבר היו לנו חשדות שמדובר במסג כל שהוא המכיל עופרת.

החלטנו לבדוק את נקודת ההיתוך של המתכת. השתמשנו במכשיר למדידת נקודת היתוך, אך בטמפרטורה של 327°C , טמפרטורת ההיתוך של עופרת, עדיין לא הגענו לנקודת ההיתוך של המתכת. אף על פי כן, תכונות החומר ומראהו הזכירו לנו עופרת, ועם זאת הסקנו שמדובר בתערובת כלשהי המכילה מתכת נוספת מלבד עופרת.

נוכחותו של חומר זה גורמת לירידה בחומציות התערובות, עד לקבלת $\text{pH} > 11$. הסביבה הבסיסית הנוצרת מגינה על הברזל שבתוך הברזל מפני קורוזיה. קצב ההידרציה וגם חוזק הבטון המתקבל תלויים במספר גורמים: טמפרטורה, יחס בין כמות המים המוספת לכמות הצמנט, דקות הטחינה של התערובת וההרכב המדויק של הצמנט. בדיקת המשתנים כמו כמות מים המוספת לצמנט יכולה להיות גם מעבדת חקר מעניינת.

אתר שמדגים⁴ ניסויים בכיתה בנושא זה כולל ניסוי ביצירת יציקת בטון בתוך צלחת פטרי ומעקב אחר שינוי ה-pH לאורך תהליך ההידרציה. האתר יכול לעזור בהמחשת הנושא או בהקמת (רק כדי לא לחזור שוב על המילה "בנייה") אתר בנייה קטן בכיתה. ניתן גם להשתמש בהדגמות שבאתר כניסוי מקדים במעבדת החקר.

שלב שלישי: קידוחי ניסיון – תעלומת המתכת המסתורית

בשלב זה היה עמוד האבן מוכן להעתקה למקומו החדש. לצורך העברה נשכרו שני מנופים גדולים שיכולים לשאת 120 טון. בליל ההעתקה תוכנן מבצע שכלל חיבור האנדרטה למנופים, ניסור העמוד על ידי שרשרת יהלום, ולאחר החיתוך – השכבת העמוד על משאית והובלתו למקומו החדש. כדי להתכונן למבצע, בוצעו "קידוחי ניסיון" כשבוע לפני יום ההעברה המתוכנן. במהלך הקידוחים שבוצעו במקום שבו תוכנן הניסור של העמוד – נשבר המקדח פעם אחר פעם. המקדח השבור הוציא שוב ושוב גוש מתכת בלתי מזוהה מן העמוד, כפי שניתן לראות בתמונה מס' 6. בעיה זו גרמה לדאגה רבה שמא לא יצליחו ביום המבצע לחתוך את עמוד האבן בעזרת השרשרת, וזאת בשל המתכת המסתורית שהתגלתה באבן.

כאן נכנסנו אנו הכימאים לתמונה.

שלב רביעי: ליל המבצע של העתקת האנדרטה

בליל המבצע הובלו לאתר העבודה שני המנופים הגדולים בארץ, שכל אחד מהם יכול לשאת 120 טון. אחד המנופים החזיק את העמוד, והוחל בעבודת השבירה של תחתית העמוד. בגלל בעיית המתכת הוחלט לא לנסר את העמוד, אלא לעבוד עם קומפרסורים (פטישי אוויר) כדי לשבור את תחתית העמוד, ובכל פעם שהגיעו למתכת, חתכו אותה בעזרת ברנר (אש המופקת מבעירה של חמצן וגז בוטאן; להבה זו יכולה להגיע לטמפרטורה המתיכה ברזל והעולה על 1536°C). בתמונה מס' 7 ניתן לראות את העמוד, לאחר שנותק ממקומו, תלוי באוויר כאשר הוא מחובר למנוף. בסופו של לילה ארוך נותק העמוד והועבר בזהירות למיקומו החדש הסמוך לבית המשפט העליון, כפי שמוצג בתמונה מס' 8, אשר צולמה עם אור ראשון בתום מבצע ההעתקה.



תמונה מס' 7: האנדרטה לאחר ניתוקה ממקומה, מוחזקת בעזרת מנוף.

עברנו לביצוע אנליזה איכותית של מסג: תגובה המזהה מסג המכיל עופרת, הנה התגובה עם חומצה חנקתית. בעוד שמתכות רבות מגיבות עם חומצה חנקתית מרוכזת ($\text{HNO}_3(\text{conc.})$), לקבלת NO , דווקא עופרת אינה מגיבה עם חומצה חנקתית מרוכזת, בגלל היווצרות שכבת חמצון על פני השטח (PbO). שכבת החמצון הנוצרת עוצרת את התקדמות התגובה של העופרת עם החומצה החנקתית המרוכזת. אבל העופרת כן מגיבה לאט עם חומצה חנקתית מהולה, תוך קבלת תערובת תחמוצות חנקן (NO , NO_2) והיעלמות אטית של גוש המתכת, כיוון שעבודה עם חומצה מהולה אינה גורמת להיווצרות שכבת החמצון על פני השטח של העופרת. כאשר ביצענו את הבדיקה של המתכת בריכוזים שונים של חומצה חנקתית, קיבלנו תוצאות שאישרו את הימצאותה של עופרת בדוגמה.

לאחר שקיבלנו אישור איכותי להשערה כי הדוגמה מכילה עופרת, יכולנו לקיים בדיקה כמותית של אחוז העופרת בדוגמה בעזרת מכשיר למדידת בליעה אטומית. לשם כך משתמשים במשקל ידוע של דוגמה, שאותו ממסים בנפח מדוד של חומצה חנקתית מהולה. מוהלים את הדוגמה לריכוז אשר נמצא בתחום הקריאה של המכשיר למדידת בליעה אטומית, ומשווים את הקריאה לגרף כיוול שהוכן על ידי בדיקת הבליעה של תמיסות המכילות יוני עופרת בריכוז קבוע.

ההשערה שלנו הייתה שבתהליך הקמת העמוד יצקו עופרת בתחתית העמוד על מנת להנמיך את מרכז הכובד של האנדרטה ולהקנות לעמוד יציבות. אך כנראה לא הייתה העופרת נקיה – אלא הכילה שאריות של ברזל. לכן המלצנו לצוות להתחיל לחתוך את העמוד בשיטה המתוכננת – לנסר ולשבור את עמוד האבן עד שיגיעו לגוש העופרת, המלצנו שכאשר יגיע המסור למתכת, יעשה שימוש בברנרים אשר להבתם תתיך את המתכת המסתורית (שכעת כבר איננה כל כך מסתורית).

אנליזת המתכת - או כפי שקראנו לה, "תעלומת המתכת המסתורית" - הלהיבה והסעירה מוחות רבים באוניברסיטה, ...כי היא הפכה בן-רגע את הכימיה המוכרת לכלי שימושי בפתרון בעיה אמיתית - לא בעיה מדומה המתקבלת כתרגיל באוניברסיטה או בבית הספר!

אתם מוזמנים לנסות ולאתגר את תלמידיכם באמצעות הבעיה המסתורית שהצגתי, ואני מבטיחה לשלוח דגימה של המתכת למורים שיתעניינו בנושא.

תודות

בהזדמנות זו אני רוצה להיפרד מהצוות המעולה של מרכז המעבדות למדעים ע"ש בלמונטה באוניברסיטה העברית בירושלים.

ברצוני להודות במיוחד לגב' אינה שיינין על תרומתה ועזרתה ועל חמש שנים מדהימות של עבודה משותפת ופורייה.

תודה גם לד"ר מתיתיהו אלטשולר על עזרתו בשלבי האנליזה של המתכת.

מקורות

1. The use of 'contexts' as a challenge for the chemistry curriculum: its successes & the need for further development and understanding, A. Pilot and A.M.W Bulte.
2. <http://pslc.ws/macrog/epoxy.htm>
3. מדריך להנדסה אזרחית, פרק 6.3: מרכיבי הבטון, י. סורוקה, הוצ' מסדה, 1990.
4. <http://matse1.mse.uiuc.edu/~tw/concrete/videos.html>



תמונה מס' 8: אנדרטת "נכזור" במקומה החדש - מול בית המשפט העליון.

סיכום

כפי שכתבתי בפתיחה למאמר, לאחרונה מדברים ועוסקים בלימודי הכימיה בתוך קונטקסט. רעיון זה בא לידי ביטוי באופן משמעותי בכל תכניות הלימוד שנכתבו במסגרת תכנית הלימודים החדשה. אין ספק שלימוד המתקיים בתוך קונטקסט אמיתי הופך להיות רלוונטי ללומדים, כפי שקרה בדוגמה זו. איש מאתנו לא ידע כלל על הכימיה שבתוך תהליכי הבנייה (למרות ששיערו שיקימת כימיה כזו), ובעקבות ההתעמקות בפרויקט למדנו רבות גם על הכימיה של שרפי האפוקסי וגם על הכימיה של הבטון - שני חומרים זמינים מאוד בחיי היומיום.