



מיסודם של  
משרד הבינוי

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

**המכון הלאומי לחקר הבנייה**  
**National Building Research Institute**



**יישום בבטון של אפר פחם המכיל אמוניה**

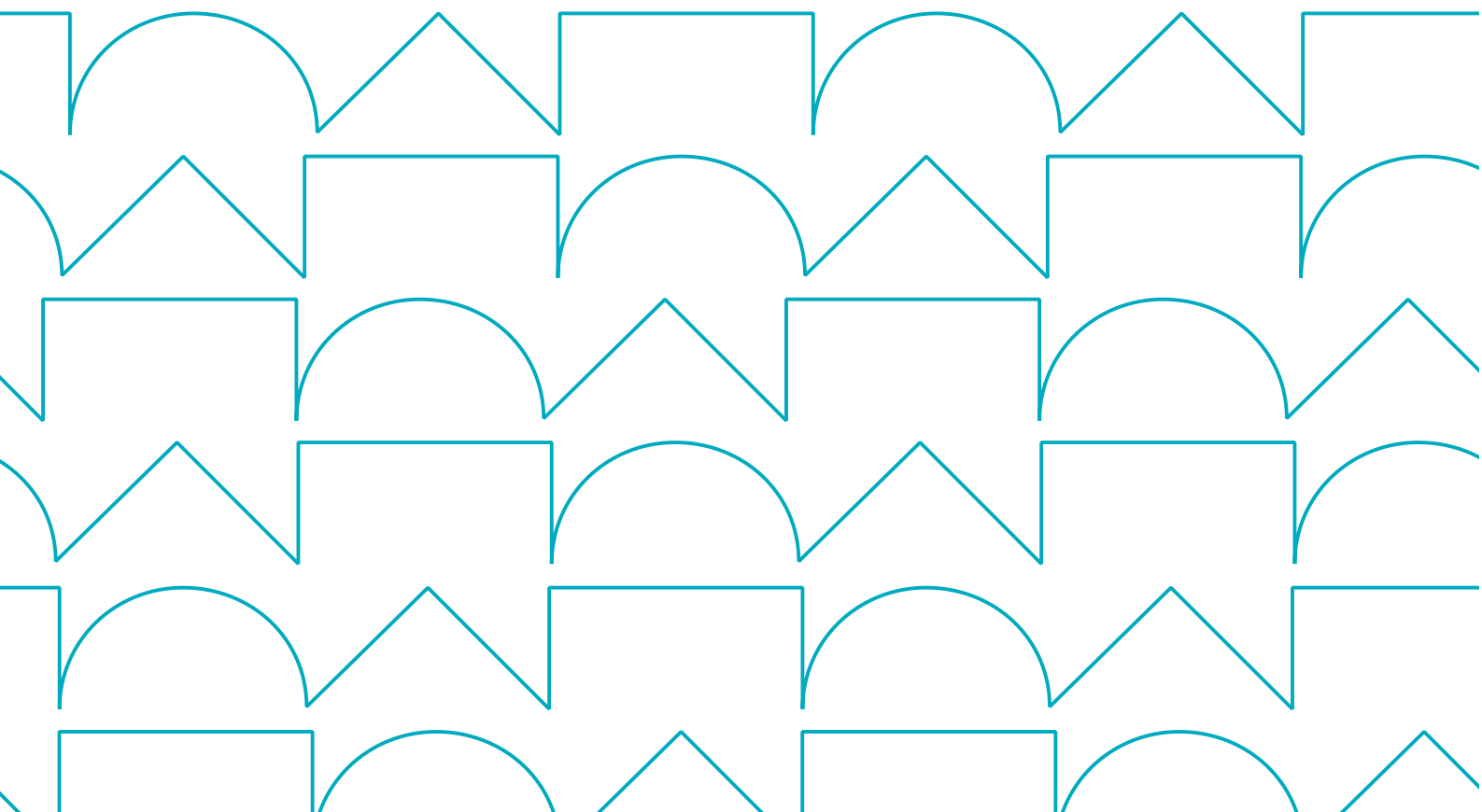
**פבל לריאנובסקי    ארנון בנטור**

**בהשתתפות:**

**שמואל גריידי    נדב זק**

**המעבדה לבריאות וגיהות תעסוקתית**

**דו"ח מסכם לשנת 2016**





Founded By  
Ministry of Construction

Technion-Israel Institute of Technology  
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של  
משרד הבינוי

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
National Building Research Institute



2020499

## יישום בבטון של אפר פחם המכיל אמוניה דוח מסכם לשנת 2016

פבל לריאנובסקי, MSc פרופ' ארנון בנטור

בהשתתפות:

שמואל גריידי נדב זק

המעבדה לבריאות וגיהות תעסוקתית

הוזמן על ידי מנהלת אפר הפחם

מס' הזמנה 38997

Copyright © 2017 by P. Larianovsky and A. Bentur  
The National Coal Ash Board and The Technion Research and Development  
Foundation, Ltd, Haifa

מרץ 2017

חיפה

אדר תשע"ז

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

## תמצית

מטרת העבודה לאפיין את ההתנהגות בבטון של מדגמי אפר פחם המכילים אמוניה אשר מתקבלים במתקן SCR החדש של חברת החשמל הישראלית. הבדיקות כללו אפיון במעבדה על פי פרוטוקול שפותח בחלקו הראשון של המחקר, תוך השוואה לבדיקות שדה וניתוח ההבדלים והמשמעויות שלהם.

המסקנות העיקריות שהתקבלו:

- ניתוח של תוצאות ניסוי השדה ומכלול ניסויי המעבדה מצביע על כך שפרוטוקול הבדיקה במעבדה מאפיין מצב שהוא הרבה יותר חמור מאשר השטח ועל כן ניתוח ואפיון על פי פרוטוקול זה הוא על צד הביטחון.
- מכלול התוצאות מצביע על קשר ליניארי בין ריכוז האמוניה באוויר מעל הבטון בבדיקה המעבדתית ובין תכולתו בבטון (בערכים יחסיים לתכולת מי התערובת), דבר המאפשר לערוך חישובים ותחזיות בהתבסס על קשר ליניארי.
- בניסוי השדה הנוכחי, הפליטה של אמוניה בשטח ועל צוות העובדים, כפי שנמדדה בשתי השיטות, הצביעה על ערך אפסי, פחות מרגישות מדידה של כ- 0.1 חל"מ. לעומת זאת הפרוטוקול המעבדתי נתן ערך מרבי של 1.2 חל"מ, דהיינו הפרש של יותר ממקדם של 12 בין הבדיקה המעבדתית ותנאי השטח, אשר בהם מהירות הרוח הייתה נמוכה מאד והטמפרטורה בסביבות 10 מ"צ. תוצאה זו היא עבור בטון עם 160 ק"ג/מ"ק אפר בעל תכולת אמוניה של 4 חל"מ.

## תוכן העניינים

1.	מבוא .....	3
2.	איפיון מעבדתי של אפר #1 .....	4
2.1	תיאור הניסוי .....	4
2.2	תוצאות .....	5
2.3	דיון ומסקנות .....	6
3.	איפיון מעבדתי של אפר #2 .....	9
3.1	תיאור הניסוי .....	9
3.2	ערבול רגיל .....	10
3.3	ערבול ממשוך .....	13
3.4	תערובת עם מוספים .....	16
4.	ניסוי שדה של התנהגות בטון עם אפר #2 .....	19
5.	מסקנות .....	25
	נספח א: סיכום תוצאות המחקר עם אפר גרמני .....	28
	נספח ב: ניסוי שדה לניטור פליטת אמוניה מבטון עם אפר שיוצר במתקן SCR של חברת החשמל בישראל .....	41

## 1. מבוא

חברת החשמל ומנהלת אפר הפחם נערכו לקליטה ולשימוש באפר פחם המתקבל במתקן שריפה עם מערכת SCR אשר נכנסה לפעולה ראשונית במהלך 2016. אפר הפחם המתקבל בתהליך זה מכיל מלח אמוניום אשר במגע עם הסביבה האלקלית בבטון משחרר גז אמוניה. באירופה נעשה שימוש נרחב באפר המתקבל בתהליך זה והגישה המקובלת בתעשייה שם שאין סכנה לשימוש בו בבטון כאשר תכולת האמוניה באפר איננה עולה על ערכים שבטווח שבין 50 ppm ל-100 ppm.

לקראת מהלך זה קודם ע"י מנהלת אפר הפחם מחקר במכון הלאומי לחקר הבנייה לבחון את הפליטה המתקבלת מבטונים עם אפר פחם המכיל אמוניה כדי לפתח שיטות ניטור ובקרה שיהיו מקובלות על כל בעלי העניין בארץ ולהכין את התשתית שתאפשר את יישום אפר הפחם שיתקבל בתהליך SCR מיד עם יישומו בארץ. המחקר נערך עם אפר פחם שהתקבל מגרמניה אשר לו תכולה גבוהה במיוחד של אמוניה, כך שיתאפשר אפיון על גבי טווח רחב של תכולות אמוניה בבטון. האפר שהתקבל הכיל 180ppm אמוניה. ראוי לציין שזה אפר חריג מאד בתכולתו ונאלצנו להמתין חודשים רבים עד שהושג מדגם זה. התוצאות של עבודת תשתית זה דווחו כבר, וסיכום שלהן באנגלית מוצג כנספח א' לדו"ח זה.

החלק השני של העבודה, אשר מדווח כאן נועד לאפיין את מדגמי האפר שהתקבלו בארץ במתקן SCR בשלבי הפעלתו הראשוניים. האפר הראשון (1#) הכיל 11 ppm של אמוניה והשני (2#) 4 ppm של אמוניה. התוכנית כללה אפיון של מדגמי האפר במתקן המעבדתי וכן גם ניטור בתנאי שטח, של בטון המיוצר במפעל ומיושם באתר בנייה. ניסיונות לבצע את התוכנית של הניסיונות באתר בנייה רגיל לא צלחו בגלל בעיות לוגיסטיות של התארגנויות ותיאומים. לפיכך הוחלט להכשיר אתר מתאים במכון הלאומי לחקר הבנייה ולבצע שם יציקה וניטור בשטח בקנה מדה מלא. הבטון יוצר במפעל של חברת רדימיקס במפרץ חיפה והובל לאתר היציקה בטכניון. שינוי זה אפשר לבצע בו זמנית ניטור של משטח הבטון שנוצק בטכניון וניטור של אותו בטון במתקן המעבדתי ובכך אפשר השוואה בין השניים כדי להבהיר את המשמעות של הבדיקה המעבדתית.

הבדיקה המעבדתית תוכננה כך שתאפשר סימולציה של פליטת אמוניה מבטון, אבל בתנאים שהם אמורים להיות חמורים יותר מאשר בשטח. על כן הניסוי בטכניון של יציקה בקנה מדה מלא במקביל לבדיקה המעבדתית של אותו בטון המגיע מהמפעל נועדה לאפשר אישוש של הנחה זו. להנחה זו חשיבות לגבי העתיד בהיבט של משמעות הבדיקה המעבדתית למעקב אחרי שינויים בתכולת האמוניה באפר והערכת משמעותם לגבי היישום בשטח: אם בדיקת הסימולציה המעבדתית אכן מייצגת תנאים קשים יותר, הרי עמידה בבדיקה המעבדתית בתנאי הסף הנדרשים על ידי רשויות הגהות והבטיחות (ריכוז אמוניה באוויר ששואף עובד בסביבה המכילה אמוניה), יבטיחו שתנאים אלה אכן מתקיימים בשטח ללא צורך בבדיקה מקבילה בשטח.

בדו"ח הנוכחי מוצגות התוצאות של האפיון המעבדתי של שני מדגמי האפר שהתקבלו במתקן SCR של חברת חשמל וכן תוצאות הניסוי בשטח. על בסיס תוצאות אלה נערך דיון וגובשו מסקנות לגבי האפשרות לשימוש באפר בארץ וכן על מתווה לניסיונות נוספים להשלמת התמונה.

## 2. איפיון מעבדתי של התנהגות בטון מאפר פחם שהתקבל במתקן SCR

### בארץ - אפר 1#

#### 2.1 תיאור הניסוי

המדגם של אפר פחם המכיל אמוניה אשר התקבל מההרצות הראשונות של מתקן SCR בחברת חשמל (ניסוי מס' 1 עם אפר ישראלי, ספטמבר 2016) אופיין במכון הלאומי לחקר הבנייה על פי הפרוטוקול שפותח ודווח למנהלת אפר הפחם (נספח א').

ריכוז האמוניה באוויר נקבע באמצעות בדיקה קולורימטרית ובבדיקת חשיפה על פי התקן של NIOSH שהיא זו המקובלת על רשויות הגהות והבטיחות בעבודה. הבדיקה על פי התקן בוצעה על ידי המעבדה לבריאות וגיהות תעסוקתית בע"מ, שמואל גריידי ונדב זק.

במהלך הבדיקה נקבע ריכוז האמוניה באוויר בעמודה מעל הבטון במהלך 24 השעות הראשונות לאחר היציקה. הבטון הכיל 120 ק"ג אפר פחם והרכב הבטון זהה לזה שבו בוצעו הניסויים עם האפר שהתקבל מגרמניה, אשר לו תכולה גבוהה מאד של אמוניה, 180 ppm (נספח א').

תכולת האמוניה של האפר שנבדק כאן הייתה 11ppm (לפי בדיקה של המעבדה בחברת חשמל).

הרכב ותכונות הבטון שנבדק מוצגים בטבלה 1.

טבלה 1: הרכב תערובת הבטון עם 120 ק"ג/מ"ק של אפר מס' 1

כינוי התערובת	תכולה מחושבת למצב רווי יבש פנים, ק"ג/מ"ק						
	צמנט	אפר	מים	יחס מים / צמנט אפקטיבי*	פוליה	עדש	שומשום
0509-16	237	120	188	0.63	543	424	375
							חול טבעי 468

\*בהנחה של מקדם יעילות של 0.50 לאפר

תכונות הבטון מוצגות בטבלה 2, במצב הטרי והקשוי.

טבלה 2: תכונות הבטון

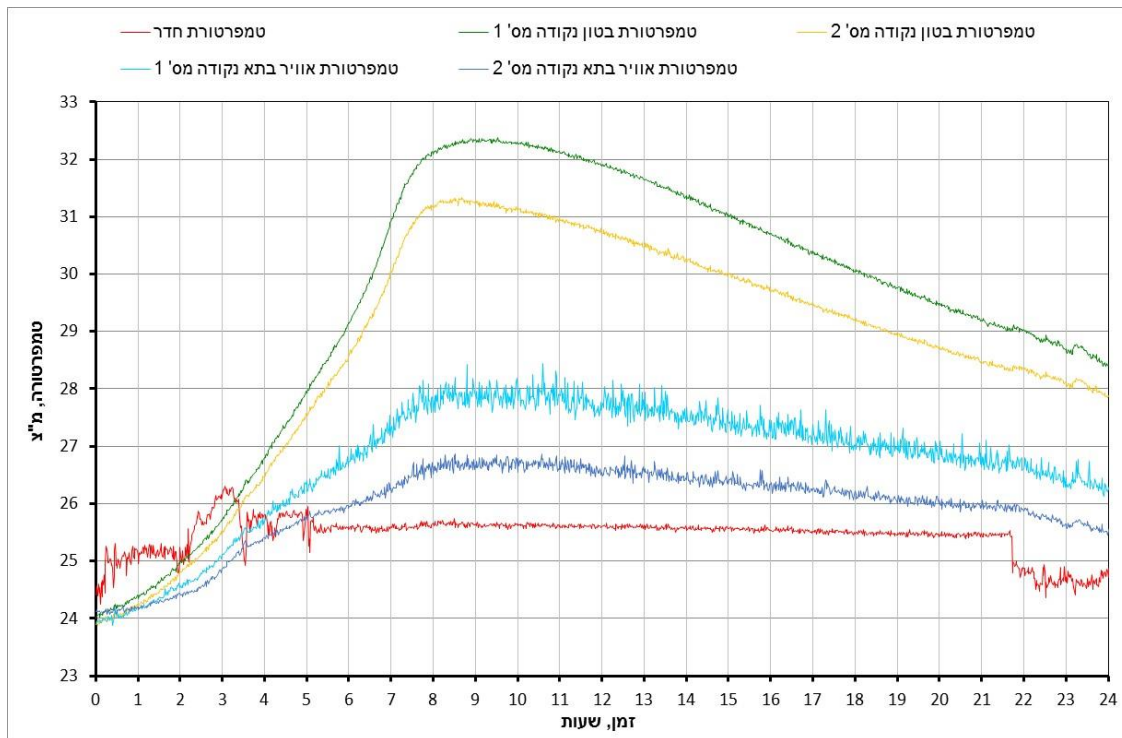
תכונות הבטון במצב טרי וקשוי							כינוי תערובות
חזק לחיצה בגיל 28 יום	חזק לחיצה בגיל 7 יום	תכולת אוויר	סומך	משקל מרחבי מדוד	משקל מרחבי מתוכנן	טמפרטורת הבטון הטרי	
מגפ"ס		ליטר/מ"ק	מ"מ	ק"ג/מ"ק	ק"ג/מ"ק	מ"צ	
32.8	19.6	17	96	2353	2367	24.1	0509-16

החוזק בגיל שבוע היה 19.6 מגפ"ס, דומה לזה שהתקבל עם האפר הגרמני, 19.8 מגפ"ס.

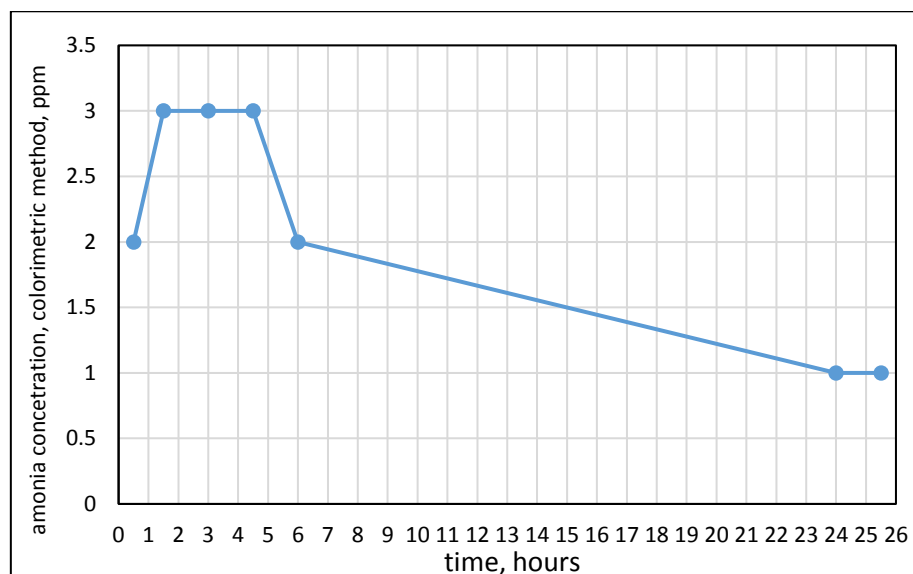
במהלך הבדיקות נערך מעקב שוטף אחר הטמפרטורה באמצעות תרמוקפלים בתוך הבטון, באוויר מעל הבטון ובחדר.

## 2.2 תוצאות

התוצאות של בדיקות הטמפרטורה מוצגות בציור 1.



ציור 1 : התפתחות הטמפרטורה בבטון, באוויר בעמודה מעל הבטון ובחדר שבו התבצע הניסוי המעקב אחר ריכוז האמוניה באוויר בוצע בשתי שיטות, קולורימטרית ולפי תקן הגהות של NIOSH. התוצאות עבור הבדיקות הקולורימטריות מוצגות בציור 2.



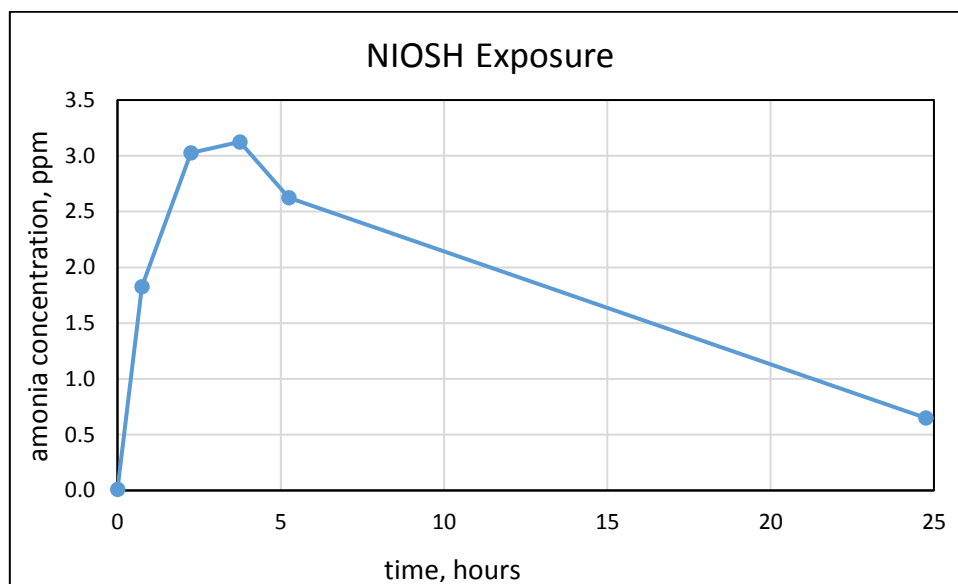
ציור 2 : ריכוז האמוניה בעמודה מעל הבטון, מדידה בשיטה הקולורימטרית



התוצאות בבדיקות הריכוז לפי התקן של NIOSH מוצגות בטבלה 2 ובציור 3.

טבלה 2 : תוצאות הבדיקה של ריכוז האמוניה לפי שיטת התקן NIOSH

ממוצע	ריכוז ppm בנקודות המדידה				זמן, שעות
	מס' 4	מס' 3	מס' 2	מס' 1	
				0.01	רקע
1.83	1.5	1.8	2.1	1.9	0-1.5
3.03	3.3	2.9	3.4	2.5	1.5-3.0
3.13	2.9	3.2	3.2	3.2	3.0-4.5
2.63	2.5	2.5	2.9	2.6	4.5-6.0
0.65	0.5	0.6	0.8	0.7	24.0-25.5

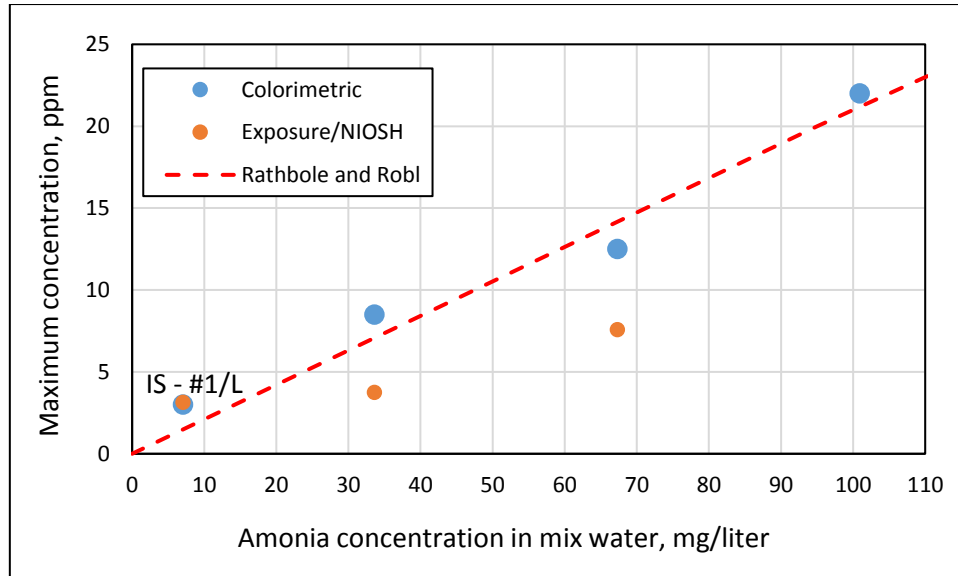


ציור 3 : ריכוז האמוניה בשיטת התקן NIOSH בתלות בזמן

### 2.3 דיון ומסקנות

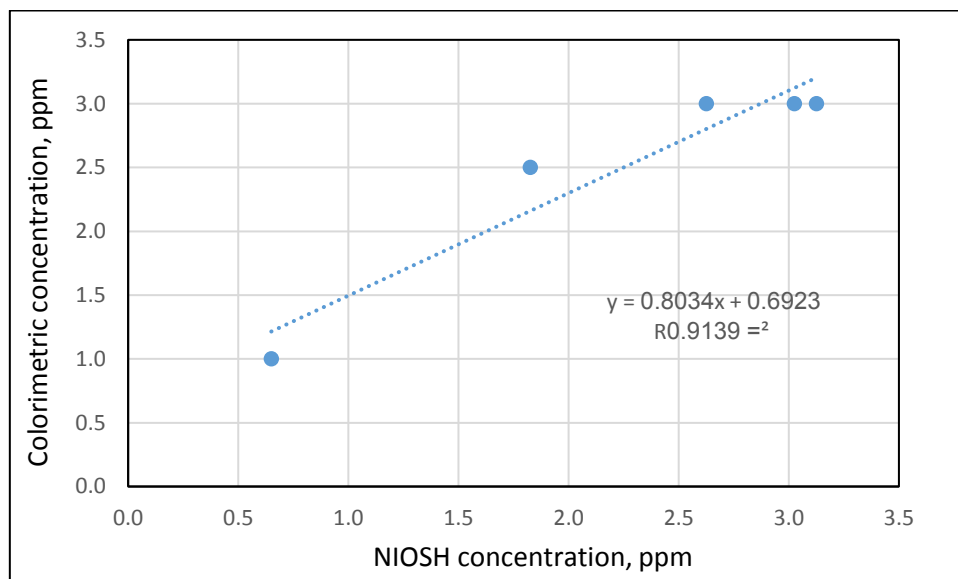
המדידות בשיטת NIOSH מצביעות גם כאן, שאין הבדל משמעותי בערך המתקבל בנקודות המדידה השונות בהיקף העבודה ובכך מאששות את המסקנה של אחידות ריכוז האמוניה בתוך העבודה.

לצורך חישוב והשוואה עם התוצאות הקודמות, חושב הריכוז של האמוניה בבטון, ביחידות של מ"ג אמוניה לליטר מי תערובת, 7.02 מ"ג/ליטר. מהתוצאות שבדו"ח הקודם נמצא שיש קשר לינארי בין ערך זה, המאפיין את תכולת האמוניה בבטון, ובין הריכוז באוויר. בציור 4 מוצגות התוצאות בבדיקות הקודמות עם האפר הגרמני, בתוספת של התוצאות של הניסוי הנוכחי, בשתי שיטות המדידה של ריכוז האמוניה באוויר. הנקודות של הניסוי הנוכחי הן בצדו השמאלי התחתון של הגרף ומסומנות כ- IS-#1 (שתי הנקודות מתלכדות למעשה).



ציור 4: קשר בין ריכוז אמוניה בבטון והריכוז באוויר במדידות המעבדתיות

ניתן לראות שאכן תוצאות ניסוי זה מקיימות את הקשר הליניארי שהתקבל במדידות של הריכוז בבדיקה הקולורימטרית, אך נראה שיש סטייה כאשר מדובר בבדיקה לפי תקן NIOSH. בבדיקות הקודמות נמצא שהערך בבדיקה הקולורימטרית גבוה בכ- 50% מזה המתקבל בבדיקה התקנית המקובלת על רשויות הגהות, לפי תקן NIOSH. בנקודת המדידה כאן, שתי הבדיקות נתנו תוצאה דומה של כ- 3ppm. השוואה בין שתי השיטות במדידה בנקודות הזמן השונות מוצגת בציור 5.



ציור 5: השוואה בין המדידה של האמוניה בשתי השיטות בנקודת הזמן של הניסוי הנוכחי

ניתן לראות שבשונה מהמגמות שבדו"ח הקודם, אשר שם המדידות היו בערכי ריכוז הרבה יותר גבוהים, כאן שתי המדידות נותנות ערכים דומים, כאשר בשיטת ה- NIOSH הערכים קצת יותר נמוכים.

יהיה צורך בניתוח הניסויים הנוספים לבחון האם יש כאן חריגה או אולי מגמה שהיא אופיינית לטווח המדידות בריכוזים הנמוכים של האמוניה באוויר.

בכל מקרה המגמות על ציר הזמן בשתי השיטות הנן דומות (ראה ציורים 2 ו-3) כאשר המקסימום הוא כ- 3ppm. ערך זה הרבה יותר נמוך מסף הבטיחות הבריאותי ועל פי ערכים המדווחים בספרות נמצא קרוב לסף הריח.

### 3. איפיון מעבדתי של התנהגות בטון מאפר פחם שהתקבל במתקן SCR

#### בארץ - אפר #2

##### 3.1 תיאור הניסוי

המדגם של אפר פחם המכיל אמוניה אשר התקבל מההרצות הראשונות של מתקן SCR בחברת חשמל (ניסוי מס' 2 עם אפר ישראלי, ינואר 2017) אופיין במכון הלאומי לחקר הבנייה על פי הפרוטוקול שפותח ודווח למנהלת אפר הפחם (נספח א').

תכולת האמוניה באפר זה הייתה 4 ppm (לפי בדיקה של המעבדה בחברת חשמל). לאור התכולה הנמוכה, שהיא מאפיינת את מתקן ה-SCR החדש לאחר התייצבותו, הוחלט להגדיל את תכולת האפר בבטון הנבדק ל- 160 ק"ג/מ"ק כדי לקבל בניסוי ערכים גבוהים ככל האפשר של פליטת אמוניה.

ריכוז האמוניה באוויר נקבע באמצעות בדיקה קולורימטרית ובבדיקת חשיפה על פי התקן של NIOSH שהיא זו המקובלת על רשויות הגהות והבטיחות בעבודה. הבדיקה על פי התקן בוצעה על ידי המעבדה לבריאות וגיהות תעסוקתית בע"מ, שמואל גריידי ונדב זק.

במהלך הבדיקה נקבע ריכוז האמוניה באוויר בעמודה מעל הבטון במהלך 24 השעות הראשונות לאחר היציקה. הבטון הכיל 160 ק"ג אפר פחם והרכב הבטון זהה לזה שבו בוצעו הניסויים עם האפר שהתקבל מגרמניה, אשר לו תכולה גבוהה מאד של אמוניה, 180 ppm (נספח א').

הבדיקה נערכה בשלושה אופנים :

- א. ערבול רגיל, תערובת סטנדרטית ללא מוספים - הפרוטוקול המקובל אשר בו מיד לאחר סיום הערבול בערבול מפל במשך 20 דקות נוצק הבטון אל העמודה במתקן הסימולציה ומתחיל ניטור האמוניה בעמודה.
- ב. ערבול ממושך, תערובת סטנדרטית ללא מוספים – סימולציה של התהליך התעשייתי אשר בו מובל הבטון במשך כשעה מהמפעל לאתר היציקה. הבטון עורבל במשך שעה בערבול המפל כאשר מתקיים ניטור של פליטת האמוניה מעל הערבול (ציור 6) ולאחר מכן הוא נוצק אל מתקן הסימולציה ומתחיל ניטור האמוניה בעמודה.
- ג. ערבול רגיל, תערובת סטנדרטית עם מוספים (סימולציה של הבטון התעשייתי) – תערובת מעבדתית רגילה בתוספת המוספים (מעכב ומשפר עבירות) ששולבו בתערובת התעשייתית.



ציור 6 : ניטור אמוניה בשיטה הקולורימטרית מעל הערבול במהלך הערבול הממושך

### 3.2 ערבול רגיל

#### 3.2.1 הרכב ותכונות הבטון

הרכב הבטון מוצג בטבלה 3.

טבלה 3 : הרכב תערובת הבטון עם 160 ק"ג/מ"ק אפר פחם

תכולה מחושבת למצב רווי יבש פנים, ק"ג/מ"ק								כינוי התערובת
חול טבעי	שומשום	עדש	פוליה	יחס מים / צמנט אפקטיבי*	מים	אפר	צמנט	
456	379	429	549	0.64	190	160	219	3101-17

\*בהנחה של מקדם יעילות של 0.50 לאפר

תכונות הבטון מוצגות בטבלה 4, במצב הטרי והקשוי.

טבלה 4 : תכונות הבטון

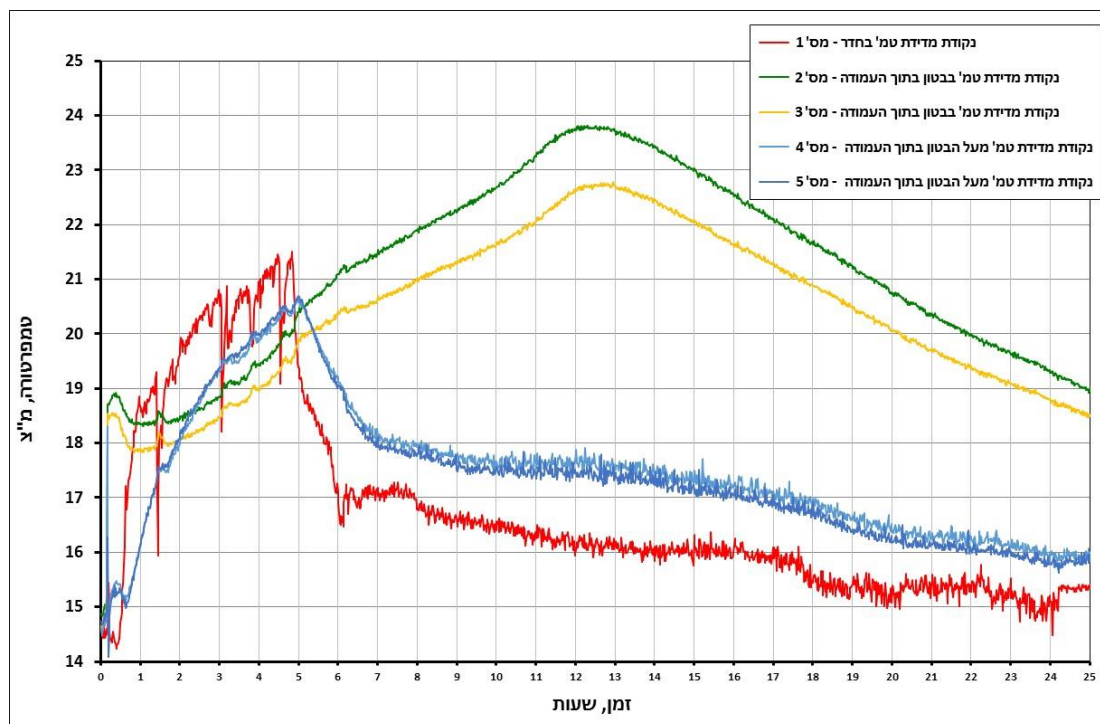
חוזק לחיצה, מגפ"ס, בגיל :			תכולת אוויר, ליטר/מ"ק	סומך, מ"מ	משקל מרחבי, ק"ג/מ"ק	טמפרטורת הבטון הטרי, מ"צ	כינוי התערובת
28 ימים	7 ימים	1 יום					
29.9	17.7	5.8	14	125	2381	17.8	3101-17

החוזק בגיל שבוע היה 17.7 מגפ"ס, קצת יותר נמוך מזה שהתקבל עם האפר הגרמני, 19.8 מגפ"ס, ומהאפר הישראלי הראשון (מס' 1), 19.6 מגפ"ס, ואת זה ניתן ליחס לתכולת האפר הגבוהה יותר במקרה זה.

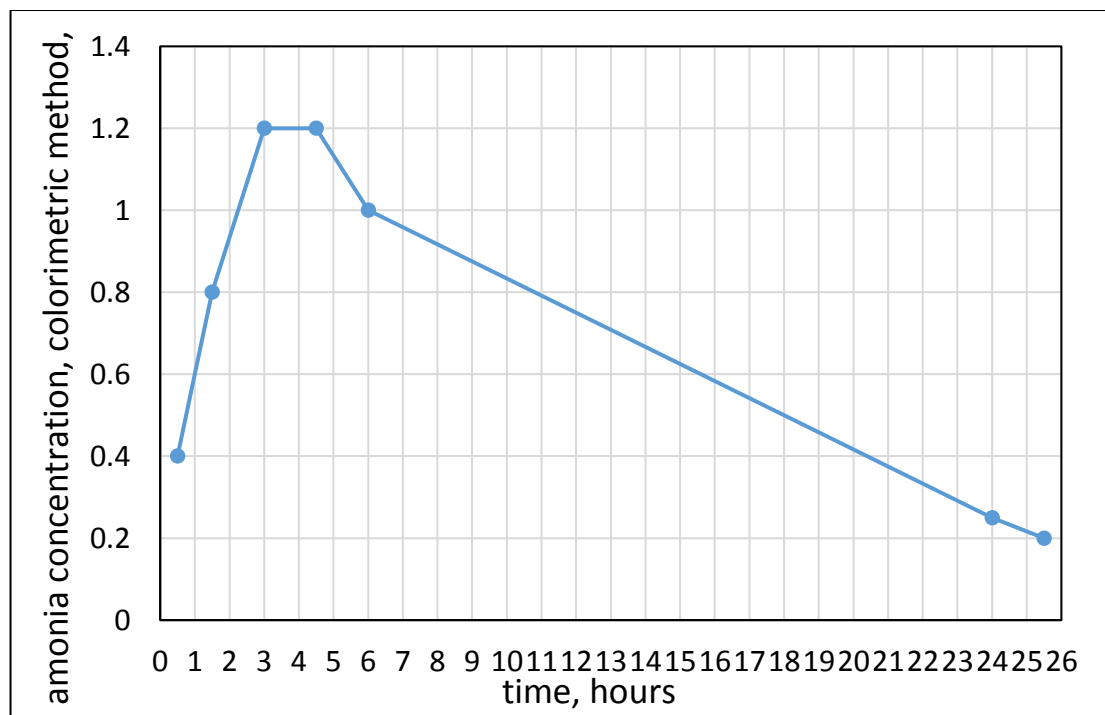
במהלך הבדיקות נערך מעקב שוטף אחר הטמפרטורה באמצעות תרמוקפלים בתוך הבטון, באוויר מעל הבטון ובחדר.

## 3.2.2 תוצאות

התוצאות של בדיקות הטמפרטורה מוצגות בציור 7.



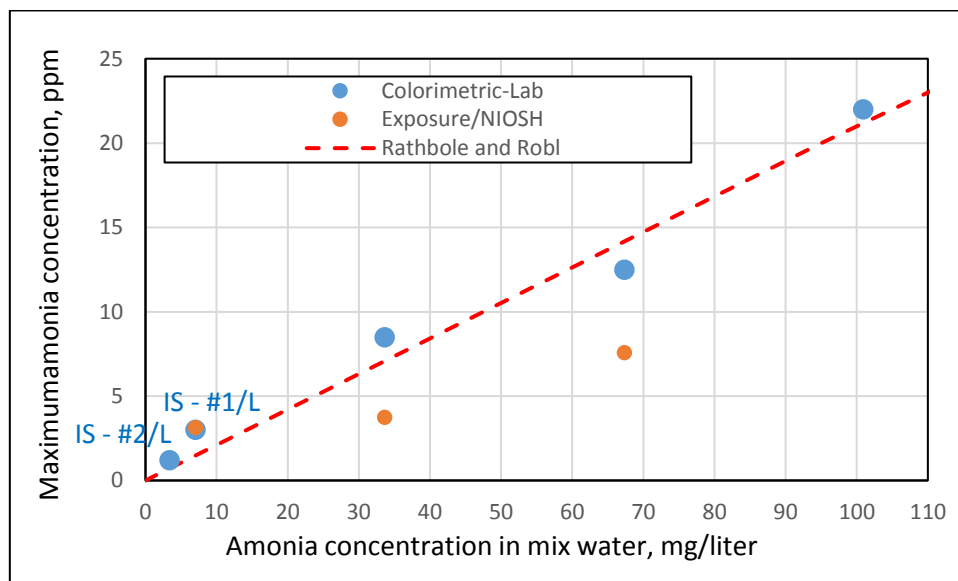
ציור 7 : התפתחות הטמפרטורה בבטון, באוויר בעמודה מעל הבטון ובחדר שבו התבצע הניסוי המעקב אחר ריכוז האמוניה באוויר בוצע בשתי שיטות, קולורימטרית ולפי תקן הגהות של NIOSH. התוצאות עבור הבדיקות הקולורימטריות מוצגות בציור 8.



ציור 8 : ריכוז האמוניה בעמודה מעל הבטון, מדידה בשיטה הקולורימטרית

### 3.2.3 דיון ומסקנות

לצורך חישוב והשוואה עם התוצאות הקודמות, חושב הריכוז של האמוניה בבטון, ביחידות של מ"ג אמוניה לליטר מי תערובת. מהתוצאות שבדו"ח הקודם נמצא שיש קשר לינארי בין ערך זה, המאפיין את תכולת האמוניה בבטון, ובין הריכוז באוויר. בציור 9 מוצגות התוצאות בבדיקות הקודמות עם האפר הגרמני, בתוספת של התוצאות של הניסוי הנוכחי, בשתי שיטות המדידה של ריכוז האמוניה באוויר. הנקודות של הניסוי הנוכחי הן בצדו השמאלי התחתון של הגרף ומסומנות כ- IS-#1/L ו- IS-#2/L. ניתן לראות שהנקודות המתקבלות בניסויי המעבדה כאן קרובות מאוד לקו שהתקבל בניסוי. גם כאן, בדומה לניסוי עם אפר מס' 1 תוצאות המדידה בשיטה הקולוריטרית דומות לאלה של שיטת NIOSH, בשונה מהמגמה שהתקבלה במדידה בריכוזים הגבוהים יותר.



ציור 9 : קשר בין ריכוז אמוניה בבטון והריכוז באוויר במדידות המעבדתיות

### 3.3 ערבול ממושך

#### 3.3.1 הרכב ותכונות הבטון

הרכב הבטון מוצג בטבלה 5.

טבלה 5: הרכב תערובת הבטון עם 160 ק"ג/מ"ק אפר פחם

כינוי התערובת	תכולה מחושבת למצב רווי יבש פנים, ק"ג/מ"ק						
	צמנט	אפר	מים	יחס מים / צמנט אפקטיבי*	פוליה	עדש	שומשום
1402-17	221	160	190	0.63	552	431	381
							458

\*בהנחה של מקדם יעילות של 0.50 לאפר

תכונות הבטון מוצגות בטבלה 6, במצב הטרי והקשוי.

טבלה 6: תכונות הבטון

תכונות הבטון במצב טרי וקשוי								כינוי תערובת
חזק לחיצה בגיל 28 יום	חזק לחיצה בגיל 7 יום	חזק לחיצה בגיל 1 יום	תכולת אוויר	סומך	משקל מרחבי מדוד	משקל מרחבי מתוכנן	טמפרטורת הבטון הטרי	
מגפ"ס			ליטר/מ"ק	מ"מ	ק"ג/מ"ק	ק"ג/מ"ק	מ"צ	
	18.9	4.2	לא נמדד	150 110	2393	2370	18.5	1402-17

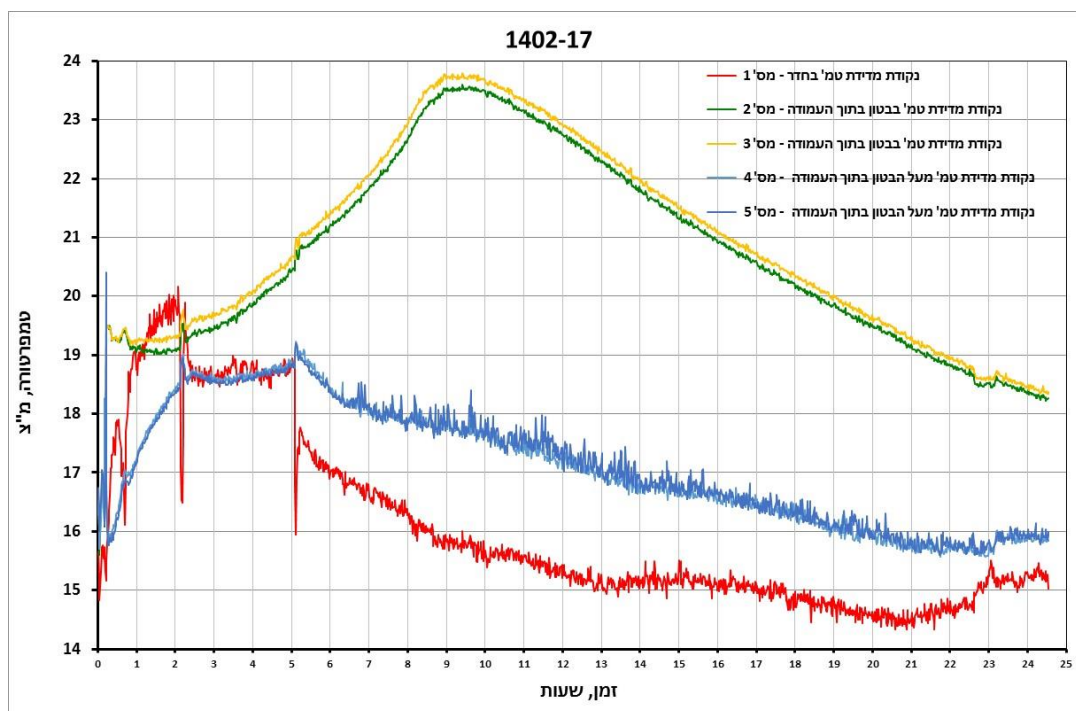
החוזק בגיל שבוע היה 18.9 מגפ"ס, קצת יותר נמוך מזה שהתקבל עם האפר הגרמני, 19.8 מגפ"ס, וזוהי למעשה לאפר הישראלי הראשון (מס' 1), 19.6 מגפ"ס. את החוזק הנמוך יחסית לאפר הגרמני ניתן ליחס לתכולת האפר הגבוהה יותר במקרה זה.

במהלך הבדיקות נערך מעקב שוטף אחר הטמפרטורה באמצעות תרמוקפלים בתוך הבטון, באוויר מעל הבטון ובחדר.

#### 3.3.2 תוצאות

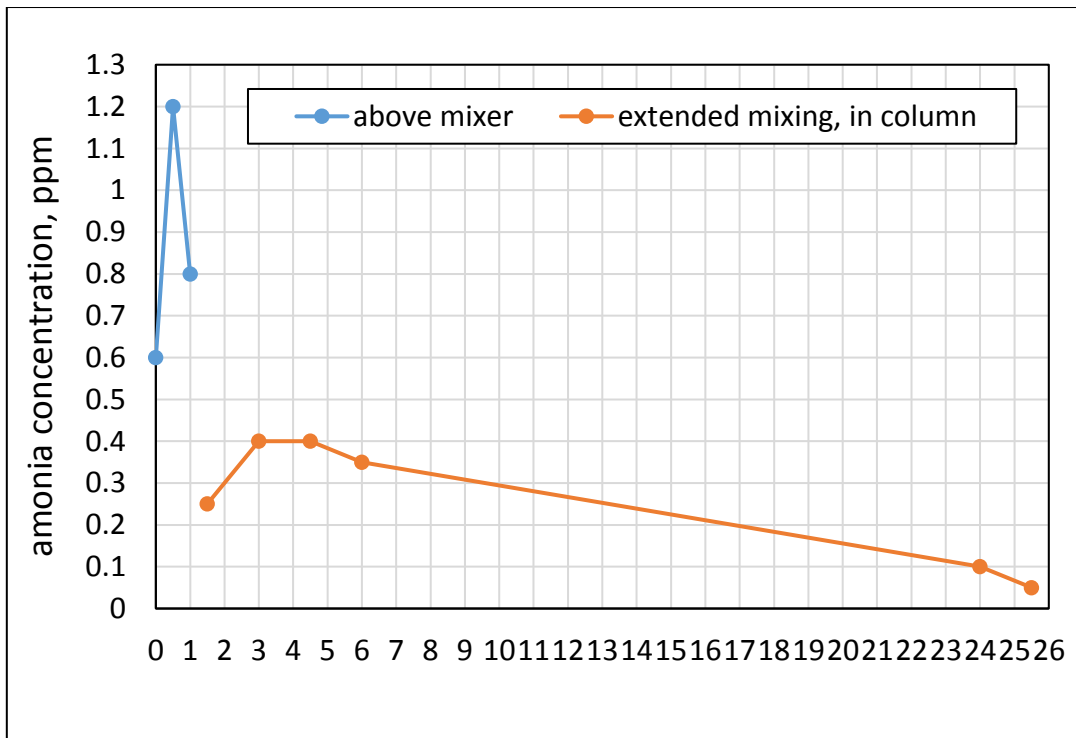
התוצאות של בדיקות הטמפרטורה מוצגות בציר 10.





ציור 10 : התפתחות הטמפרטורה בבטון, באוויר בעמודה מעל הבטון ובחדר שבו התבצע הניסוי

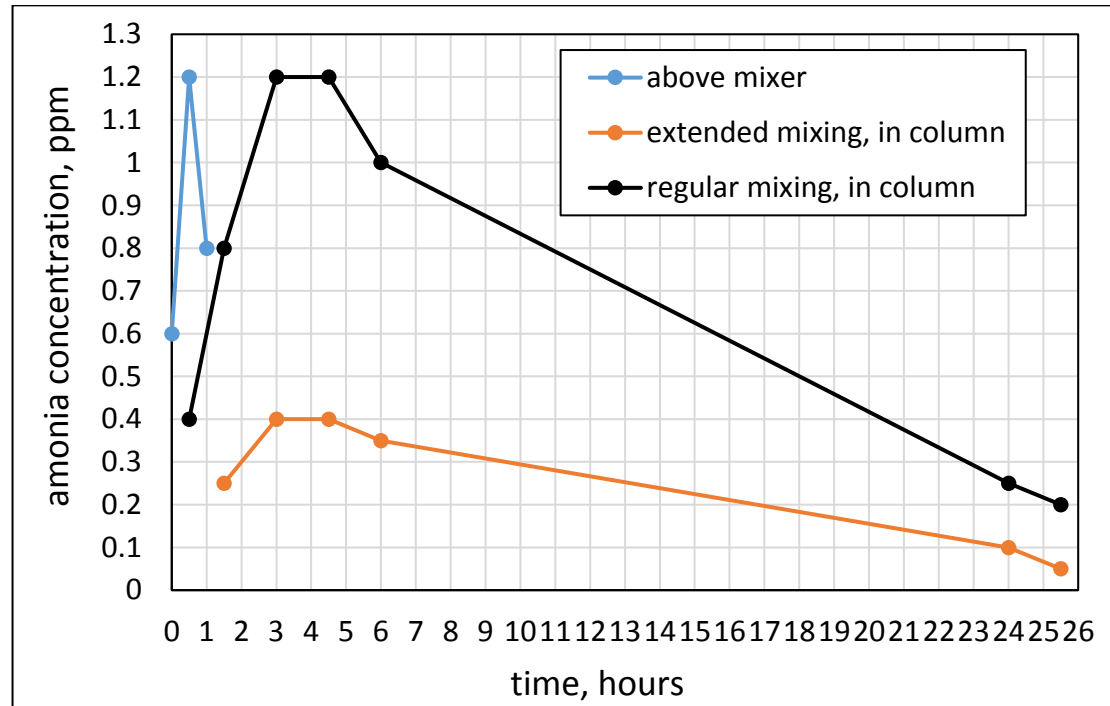
המעקב אחר ריכוז האמוניה באוויר בוצע בשיטה קולורימטרית. התוצאות מוצגות בציור 11.



ציור 11 : ריכוז האמוניה בעמודה מעל הבטון, מדידה בשיטה הקולורימטרית

### 3.3.3 דיון ומסקנות

השוואה בין הפליטה של האמוניה בערבול רגיל וממושך מוצגת בציור 12. ניתן לראות שבערבול ממושך הפליטה בעמודה נמוכה בהרבה, וניתן לקשור זאת עם הפליטה הראשונית מעל הערבול במהלך הערבול הממושך.



ציור 12: השוואה בין עקומי הפליטה של האמוניה בבדיקה רגילה (ערבול קצר) ובערבול ממושך, מעל הערבול ובתוך העמודה של מתקן הסימולציה

### 3.4 תערובת מעבדתית רגילה בתוספת המוספים של התערובת

#### התעשייתי, ערבול רגיל

הבטון שיצור במפעל הכיל מוסף משפר עבידות ומעכב. השפעתם של שני אלה נקבעה על התערובת המעבדתית הרגילה, אשר אליהו הוסיפו את שני המוספים הללו במינון זהה לזה שהוסף במפעל.

#### 3.4.1 הרכב ותכונות הבטון

הרכב הבטון מוצג בטבלה 7.

טבלה 7: הרכב הבטון עם 160 ק"ג/מ"ק אפר פחם

חול טבעי	שומשום	עדש	פוליה	יחס מים/ צמנט אפקטיבי*	מים	אפר	צמנט	כינוי התערובת
455	379	429	549	0.64	191	160	220	2802-17

\*בהנחה של מקדם יעילות של 0.50 לאפר

מוסף 1: מעכב – 0.10%, כמות – 0.220 ק"ג/מ"ק  
מוסף 2: משפר עבידות – 2.2%, כמות – 4.840 ק"ג/מ"ק

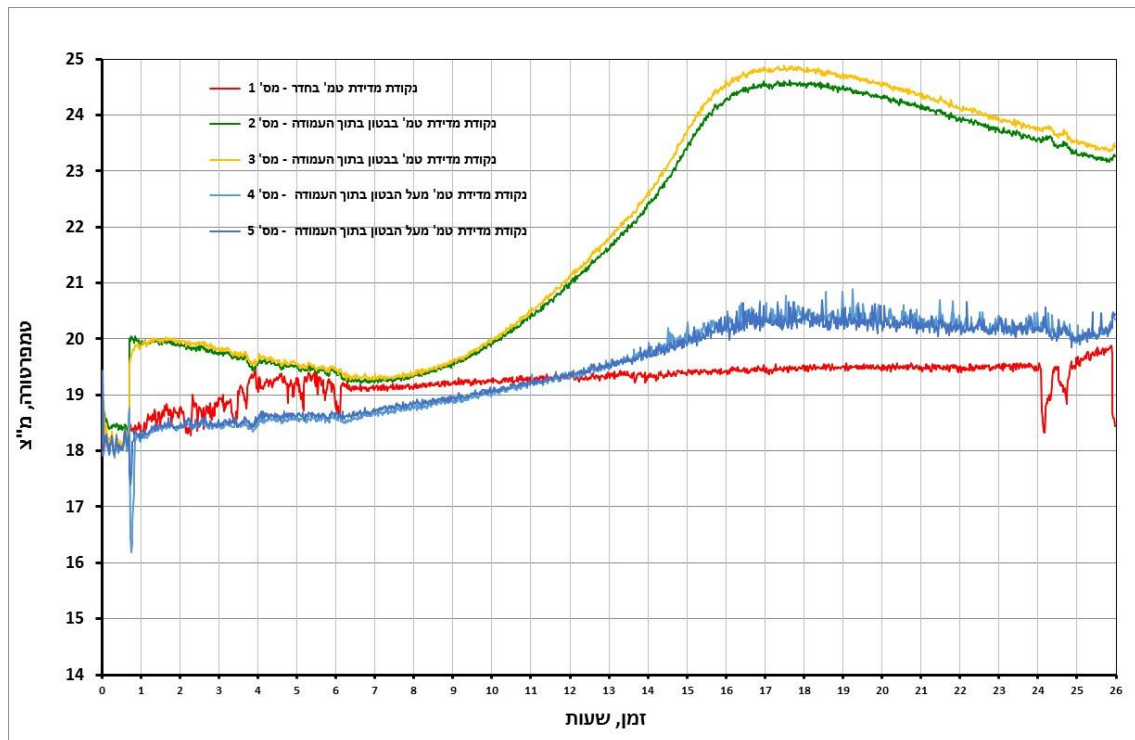
תכונות הבטון מוצגות בטבלה 8.

טבלה 8: תכונות הבטון הטרי והקשוי

חוזק לחיצה, מגפ"ס, בגיל			תכולת אוויר	סומך	משקל מרחבי	טמפרטורת הבטון הטרי
28 ימים	7 ימים	1 יום	ליטר/מ"ק	מ"מ	ק"ג/מ"ק	מ"צ
		4.2	1.6	מעל 220	2387	20.0

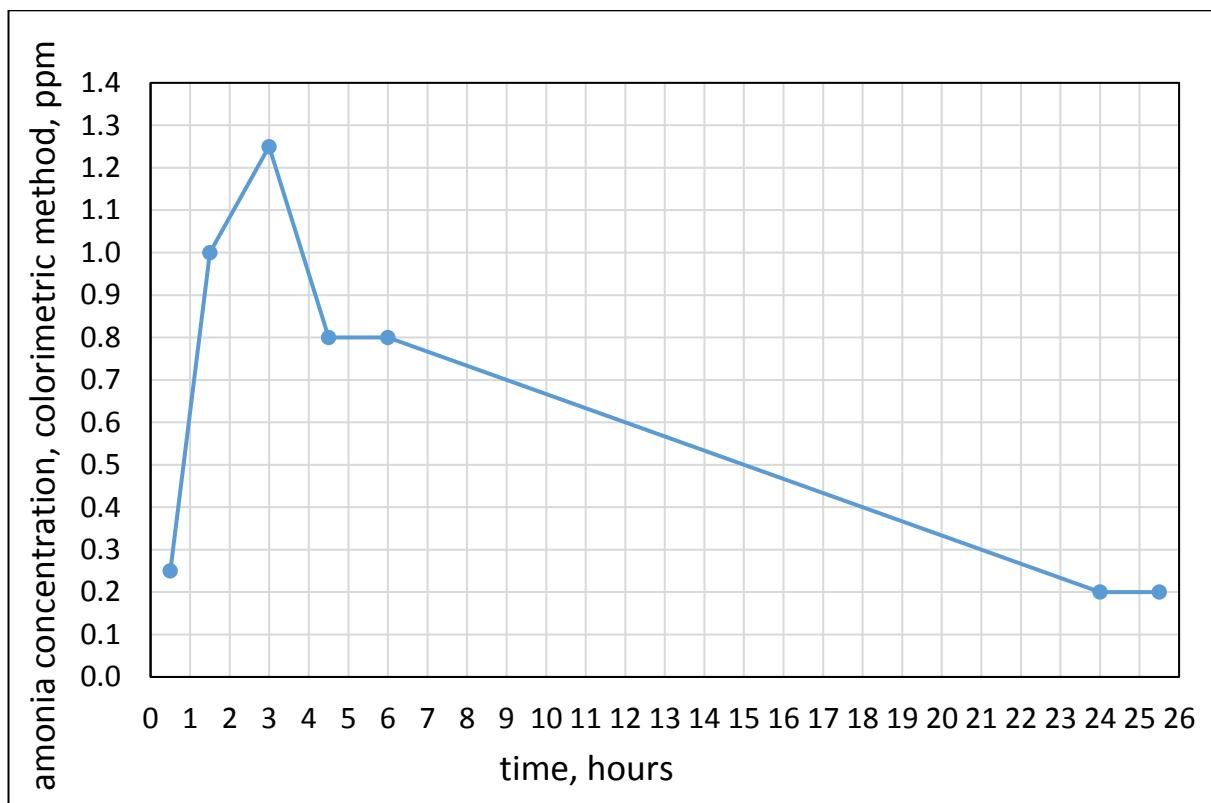
#### 3.4.2 תוצאות

התוצאות של עקומי הטמפרטורה מוצגות בצירור 13.



ציור 13 : התפתחות הטמפרטורה בבטון, באוויר בעמודה מעל הבטון ובחדר שבו התבצע הניסוי

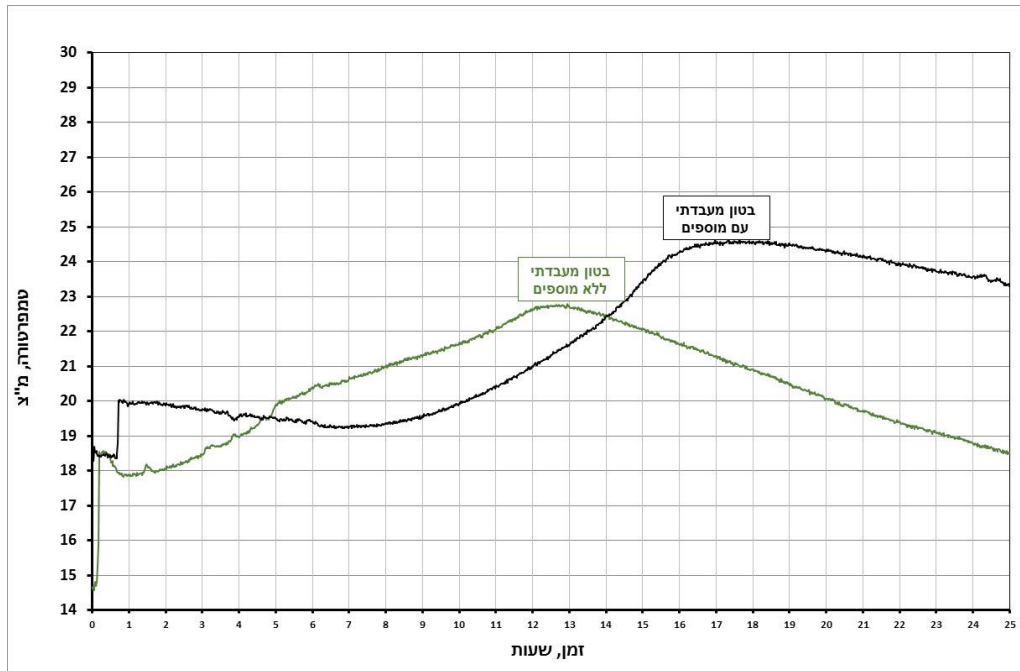
המעקב אחר ריכוז האמוניה באוויר בוצע בשיטה קולורימטרית. התוצאות מוצגות בציור 14.



ציור 14 : ריכוז האמוניה בעמודה מעל הבטון, מדידה בשיטה הקולורימטרית

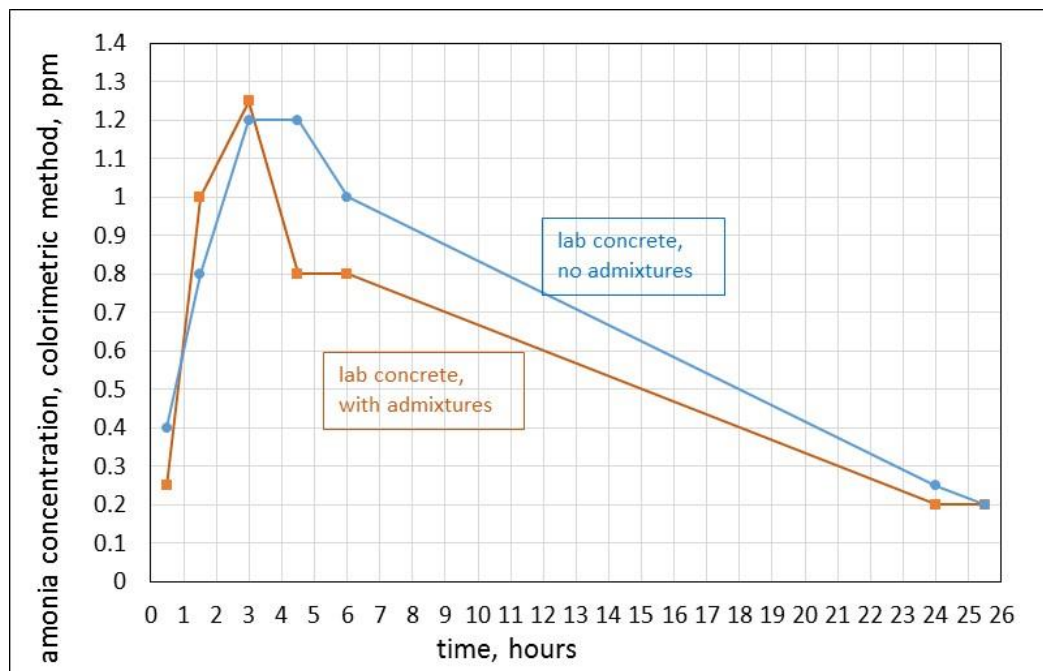
## 3.4.3 דיון

השוואה בין עקומי הטמפרטורה של התערובת הסטנדרטית, עם וללא מוספים מוצגת בציור 15. ניתן לראות בברור את השפעת המעכב.



ציור 15 : עקומי הטמפרטורה של התערובות המעבדתיות הסטנדרטיות, עם ובלי מעכב

עקומי ריכוז האמוניה באוויר כפי שנמדדו בשיטה הקולורימטרית בתערובות המעבדה הסטנדרטיות עם ובלי מוספים מוצגות בציור 16. העקומים מאד קרובים אחד לשני ולא ניתן להבחין באפקט משמעותי של העיכוב.



ציור 16 : עקומי ריכוז אמוניה בעמודה מעל הבטון בהרכבים סטנדרטיים עם וללא מוספים

#### 4. ניסוי שדה של התנהגות בטון מאפר פחם שהתקבל במתקן SCR

##### בארץ - אפר #2

דיווח מפורט של ניסוי השדה מוצג בנספח ב' של דו"ח זה. בפרק זה מוצגות עיקר התוצאות כדי לאפשר ניתוח מלא והשוואה עם בדיקות המעבדה הרגילות.

הרכב הבטון התעשייתי שיוצר במפעל והובא לטכניון מוצג בטבלה 9. הבטון מכיל שני מוספים, משפר עבידות ומעכב ואלה שמשו גם לצורך הסימולציה בבטון המעבדה כמתואר בפרק הקודם.

טבלה 9 : הרכב הבטון ותכונותיו

חוזק לחיצה בגיל (ימים), מגפ"ס						תכולת אוויר, ליטר/מ"ק	סומך, מ"מ	משקל מרחבי מדוד, ק"ג/מ"ק	טמפרטורת הבטון, מ"צ	הרכב הבטון, ק"ג/מ"ק			
90	60	28	14	7	1					אגרגטים	מים	אפר	צמנט
		39.4	33.9	24.8	9.1	1.5	230	2300	18.2	1659	191	160	290

לוח הזמנים של ההעמסה והפריקה מוצג להלן :

- ערבול ראשון : התחלת ההעמסה במפעל 06: 55, יציאה 07: 10, הגעה לטכניון 07: 50, סיום פריקה 08: 00
- ערבול שני : יציאה מהמפעל 07: 29, הגעה לטכניון 08: 05
- ערבול שלישי : יציאה מהמפעל 07: 45, הגעה לטכניון 08: 30
- סיום יציקת המשטח בטכניון : 09: 10
- התחלת הניטור על גבי המשטח : 08: 00
- התחלת הניטור במתקן המעבדתי : 09: 00

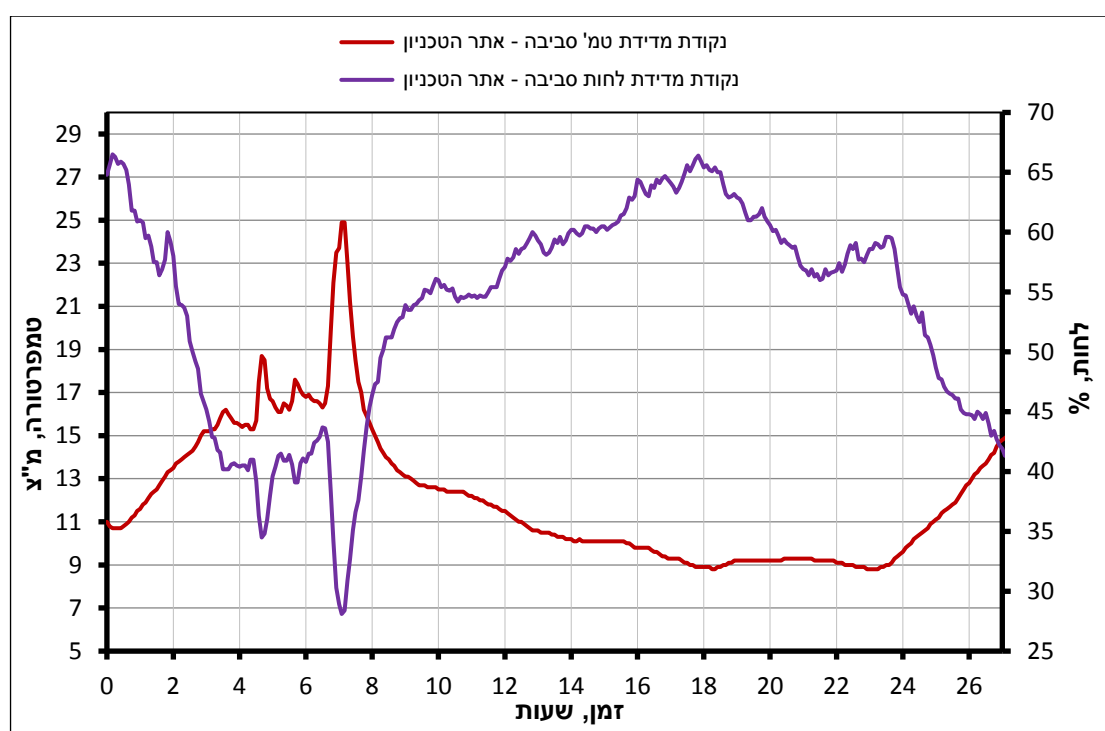
תוצאות הניטור של הטמפרטורה, הלחות ומהירות זרימת האוויר באמצעות המכשור של המעבדה לבריאות וגהות תעסוקתית ושל המכון הלאומי לחקר הבנייה, אשר בוצעו במקביל, מוצגים בטבלה 10 ובציור 17.

מהירות זרימת האוויר בשטח, על גבי משטח הבטון נעה בטווח שבין 0.27 ל- 0.76 מטר/שנייה, הנחשבת למהירות רוח נמוכה מאד. מהירות זרימת האוויר במתקן הסימולציה היא 0.15 מטר/דקה (0.0025 מטר/שנייה), הנחשבת כמאפיינת של אוויר "כמעט עומד" והיא נמוכה בערך פי 50 מזו של הזרימה בשטח.

בגלל מיקום אתר היציקה, כיווני זרימת האוויר השתנו ובאתר נוצרו מערבולות אוויר שגרמו לתנועות אוויר לכל כיוון אפשרי, עד כדי כך שמניפות השבשבת עמדו לפרקי זמן קצרים, והחלו להסתובב בכיוון הנגדי.

טבלה 10 : ניטור טמפרטורה, לחות יחסית ומהירות זרימת אוויר על יד המעבדה לבטיחות וגהות תעסוקתית

שעה	טמפרטורה מ"צ	לחות יחסית %	מהירות זרימת אוויר מטר/שנייה
08:00	10.8	75.8	0.36
09:00	13.3	62.6	< 0.01
10:00	15.5	55.7	0.27
12:30	17.3	50.7	0.45
14:00	14.7	57.1	0.76



איור 17 : ניטור טמפרטורה ולחות באמצעות ציוד של המכון הלאומי לחקר הבנייה מעל משטח הבטון

ניטור האמוניה באתר על פי תקן NIOSH, שבו הוצמדו לעובדים משאבות מדידה עם שפופרת לספיחת אמוניה, כלל את המרכיבים הבאים :

- מתקן דגימה אחד שהוצמד למפעיל המתקן
- מתקן דגימה שהוצב בסמוך לתחתית הערבול בעמדת מפעיל הערבול
- מתקן דגימה אחד לדוגם שלקח דגימת בטון מערבול מס' 3 לצורך בדיקות שגרתיות
- מתקני דגימה שהוצמדו לנהגים של ערבול מס' 1 ומס' 3, לכל נהג שני מתקנים, האחד למדידה מתחילת תהליך הטענת הערבול ועד גמר פריקת הבטון באתר הטכניון לנהג אחד

(ערבל מס' 1), ולנהג השני (ערבל מס' 3) עד חזרתו למפעל הבטון ולאחר שטיפת הערבל, השנייה במהלך פריקת הבטון באתר בטכניון במשך 15 דקות (מדידת STEL)

בשיטה מדידה זו הכמות הקטנה ביותר של אמוניה שניתן לזהות בבדיקת מעבדה של החומר בשפופרת אליה נספח האמוניה היא 0.5 מק"ג. לכן רגישות המדידה תהיה גבוהה יותר ככל שנפח הדגימה של האוויר (תלוי במשך הבדיקה) יהיה גדול יותר. בבדיקות הנוכחיות משך הזמן נע בין 15 ל- 123 דקות, דהיינו נפח אוויר שבין 1.5 ל- 15 ליטר ורגישות מדידה בטווח שבין 0.05 ל- 0.5ppm.

הניטור של האמוניה באוויר באמצעות הציוד הקולורимטרי התבצע בצורה שמאפשרת קבלת רגישות מרבית, דהיינו מדגם אוויר של 500 סמ"ק, עם רגישות של 0.1ppm. מרבית הבדיקות לא הראו נוכחות של אמוניה, דהיינו נתנו קריאה של אפס, והן הוצגו על כן כפחות מ- 0.1ppm. הטמפרטורה הייתה 8.9 מ"צ בתחילת ההעמסה של הערבל הראשון. התוצאות הן כלהלן:

- ערבל מס' 1 ו-3 מדידה באזור פתח כניסה של חומרים ואגרטים לערבל: פחות מ- 0.1ppm
- מפעל בטון, מקום דגימה והכנת מדגמי בטון עבור בדיקה (חוזק לחיצה): פחות מ- 0.1ppm
- 10 ס"מ מעל המריצה שבה היה הבטון שנלקח לצורך הכנת המדגמים: 0.5 ppm

תוצאות אלה מראות שהריכוז של האמוניה באוויר בכל נקודות המדידה הוא אפסי, ורק כאשר מתקרבים לפני הבטון, 10 ס"מ ממנו יש תכולה נמוכה של אמוניה בשיעור של 0.5 ppm.

התוצאות של הניטור של המפעילים והנהגים מוצג בטבלה 11.

טבלה 11: תוצאות הניטור לאמוניה של המפעילים בתחנת הבטון והנהגים לפי תקן NIOSH

תפקיד	ריכוז אמוניה, ppm	משך בדיקה, דקות
מפעיל	< 0.1	60
עמדת מפעיל בתחתית הערבל	< 0.1	60
דוגם בטון מערבל מס' 3	< 0.2	43
נהג ערבל מס' 1	< 0.05	112
נהג ערבל מס' 1	< 0.2	15
נהג ערבל מס' 3	< 0.1	123
נהג ערבל מס' 3	< 0.5	15

המשמעות של כל התוצאות האלה היא שבטווח הרגישות של הבדיקה (נפח מדגם האוויר ויכולת זיהוי של 0.5 מק"ג) ריכוז האמוניה היה אפסי.

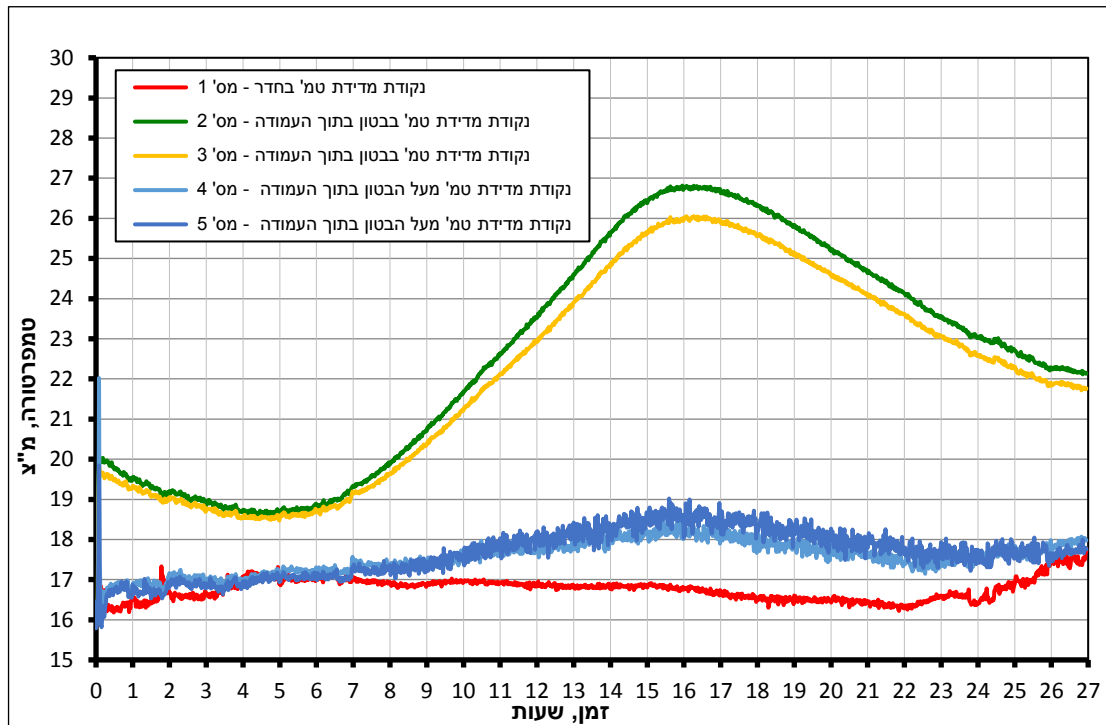
תוצאות הניטור של צוות המכון הלאומי לחקר הבנייה במהלך היציקה מוצגות בטבלה 12.

טבלה 12: תוצאות ניטור הצוות במהלך היציקה של המשטח באתר המכון הלאומי לחקר הבנייה

תפקיד	ריכוז אמוניה, ppm	משך בדיקה, דקות
צוות טכניון	< 0.1	67
צוות טכניון	0.2	67

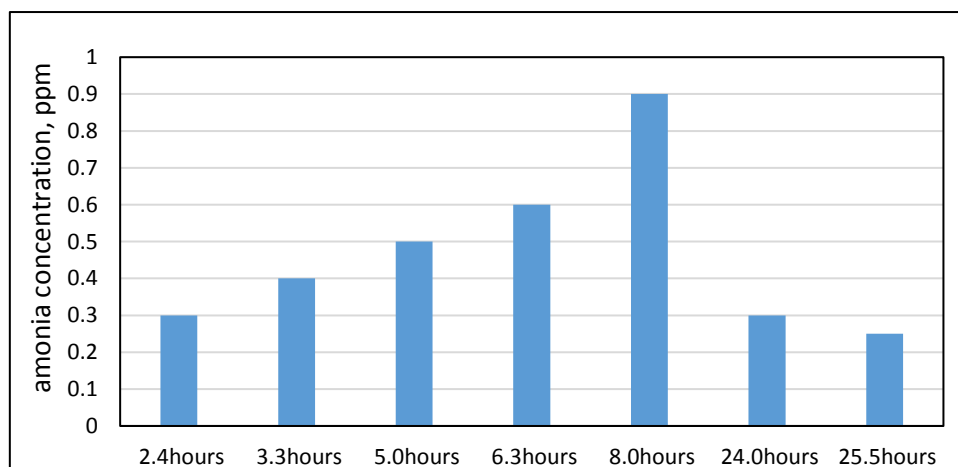


תוצאות ניטור הטמפרטורה בעמודה במתקן המעבדתי מוצגת בציור 18.



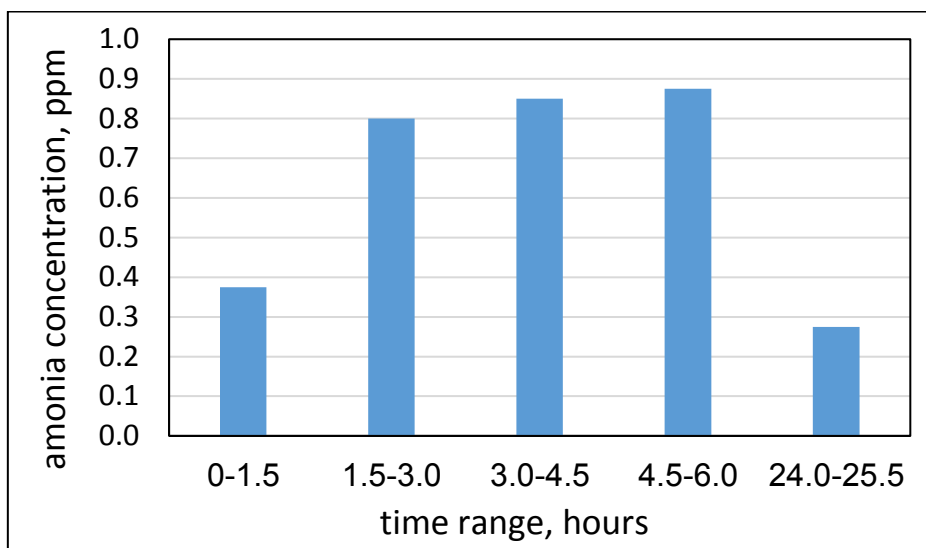
ציור 18 : פרופיל הטמפרטורה של הבטון במתקן הסימולציה המעבדתי

הניטור בבדיקה הקולורимטרית הראה פליטה אפסית של אמוניה מעל משטח הבטון (מדידה ברגישות של כ- 0.1 ppm) בשעה שבבדיקה במתקן המעבדתי נצפו ערכים נמוכים, אך ניתנים למדידה, של ריכוז אמוניה, שהגיעו ל- 0.9 ppm לאחר 8 שעות וירדו ל- 0.3 ppm לאחר יום, ציור 19.



ציור 19 : ריכוזי אמוניה בעמודה מעל הבטון בבדיקה המעבדתית במדידה קולורимטרית

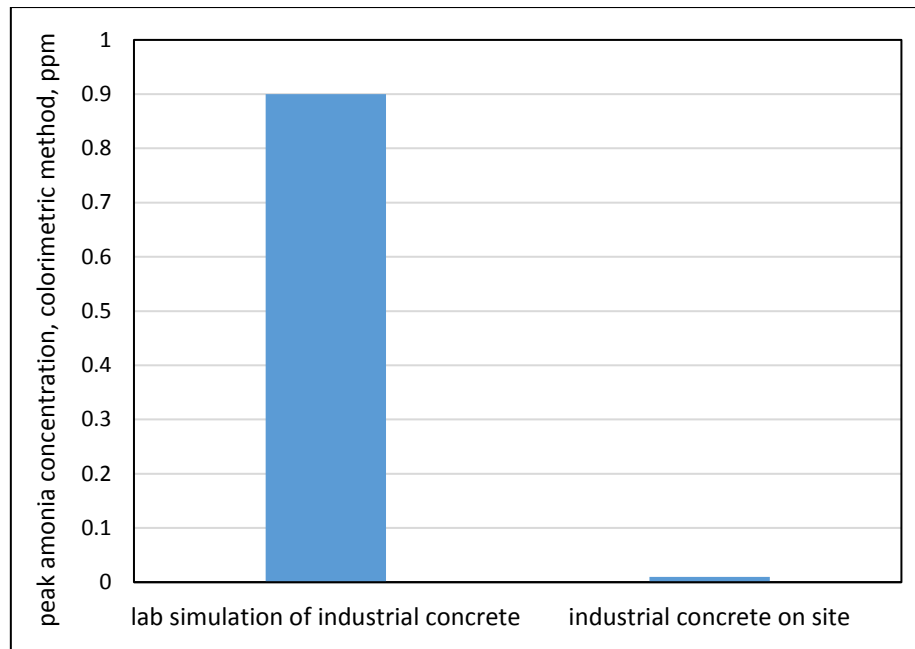
המגמות בבדיקה לפי תקן NIOSH באתר היציקה ובמתקן הסימולציה המעבדתי הראו גם הם מגמות דומות, פליטה אפסית במשטח הבטון (נקודות המדידה הקבועות, טבלה 11) וערכים נמוכים במתקן המעבדתי, שהגיעו למקסימום של כ- 0.9 ppm בסוף יום המדידה, בין 4.5 ל- 6 שעות מתחילת המדידה בעמודה, כ- 6 עד 7.5 שעות מהעמסת הערב במפעל, ציור 20. הערך הזה של 0.9ppm דומה לערך המתקבל בבדיקה הקולורמטרית, ציור 19.



ציור 20 : ריכוזי אמוניה בעמודה מעל הבטון בבדיקה המעבדתית במדידה לפי NIOSH (הזמנים הם מתחילת המדידה בעמודה של מתקן הסימולציה המעבדתית, והם מתחילים לאחר 1.5 שעות מהעמסת הערב במפעל).

הפליטה האפסית בנקודות המדידה באתר תואמות את התצפיות של מדידת האמוניה בצוות אשר הראתה חשיפה אפסית, גם באתר היציקה בטכניון וגם באתר המפעל, טבלאות 11 ו-12.

בהקשר זה כדאי להשוות בין ריכוזי האמוניה המרבי באוויר מעל משטח הבטון בחוץ והריכוז של האמוניה של אותו בטון בתוך המתקן המעבדתי, ציור 21.

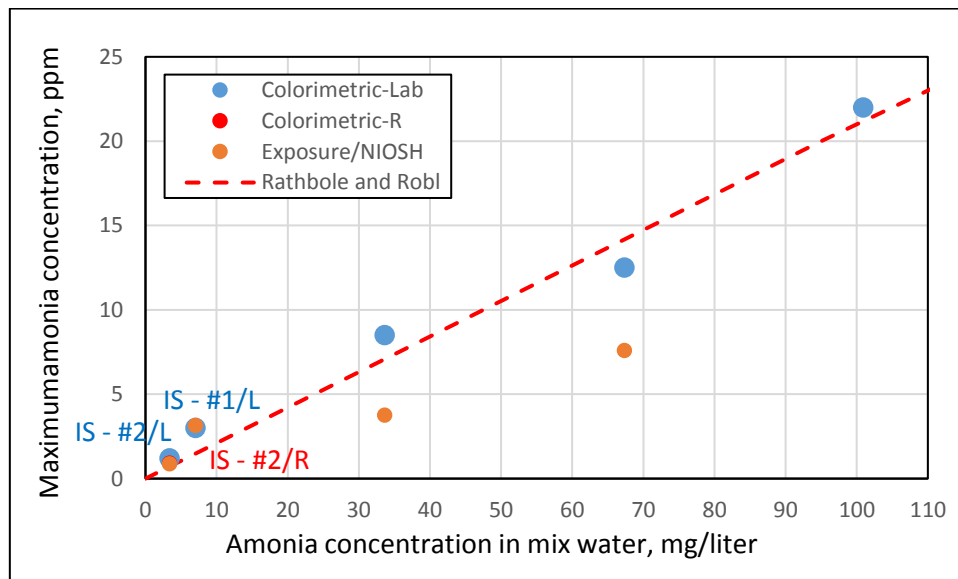


ציור 21 : ריכוז מרבי של אמוניה באוויר מעל הבטון במשטח היצוק בשטח ומעל הבטון במתקן הסימולציה המעבדתי

מאחר והרכב הבטונים זהה ותנאי הטמפרטורה אינם שונים באופן ניכר, הרי ניתן ליחס את ההבדל המשמעותי בריכוז בין שני התנאים (ציור 21) להבדל במהירות זרימת האוויר שהיא אמנם נמוכה בתנאי הסביבה בחוץ, אך עדיין כ-פי 50 גבוהה יותר ממהירות הזרימה במתקן המעבדתי המוגדרת כאוויר כמעט עומד.

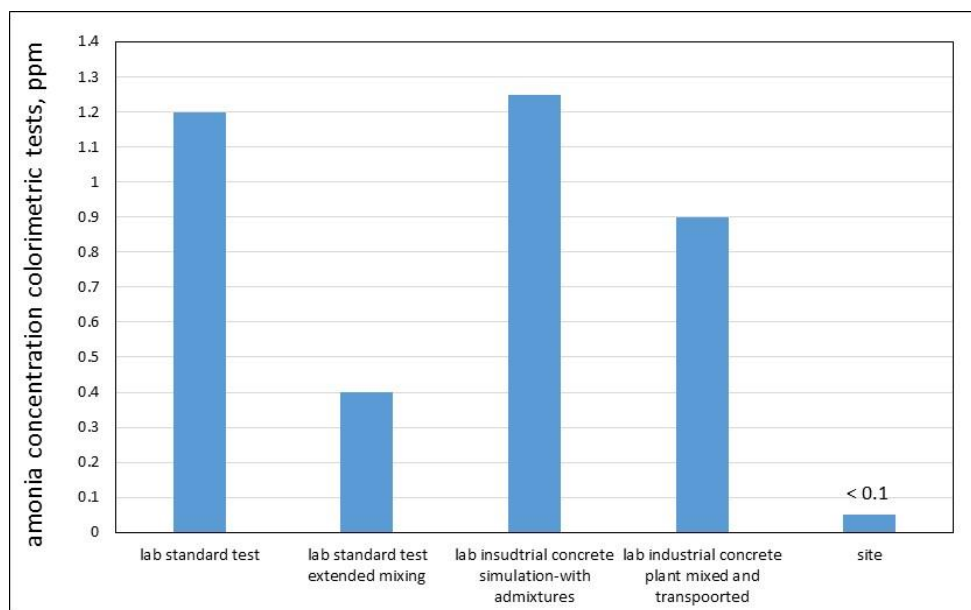
## 5. מסקנות

א. ריכוז של כל תוצאות המדידה שבוצעו עד כה במתקן המעבדתי מצביע על קיום קשר ליניארי בין תכולת האמוניה במי התערובת ובין הריכוז המרבי של אמוניה שנמדד במתקן מעל הבטון (ציור 22). בתחום הריכוזים של מעל 30 ppm/liter mix water הריכוז שנמדד בשיטה הקולורימטרית היה גבוה משמעותית מהריכוז שנמדד בשיטת NIOSH. בריכוזים נמוכים יותר ערכי האמוניה שנמדד בשתי השיטות היו דומים. אין בידינו בשלב זה הסבר לשוני בהתנהגות אך המסקנה החשובה היא שהמדידה בשיטה הקולורימטרית נותנת ערך גבוה או שווה לשיטת NIOSH ולפיכך שימוש בה בבדיקות אלה מציב אותנו בצד הביטחון.



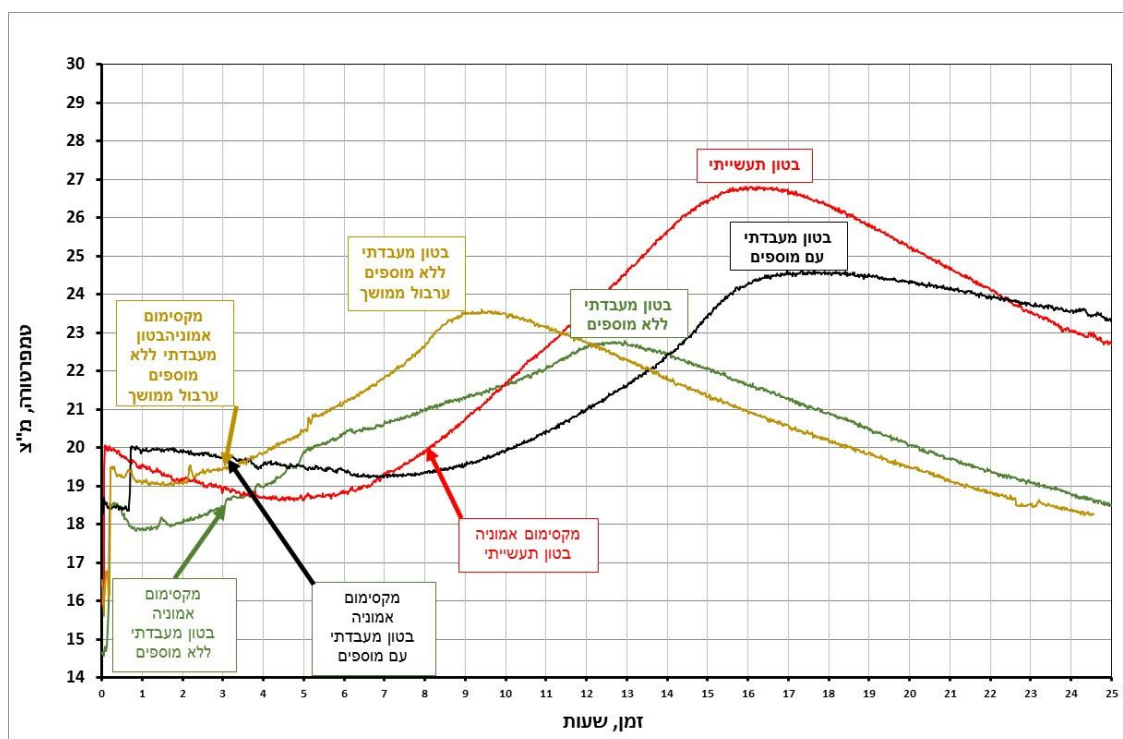
ציור 22 : תיאור כל התוצאות של ריכוז אמוניה מרבי במתקן המעבדתי בתלות בריכוז של האמוניה במי התערובת בבטון

ב. השפעת צורת הכנת הבטון ותנאי המדידה (בשטח לעומת המתקן המעבדתי) מתוארת בציור 23 עבור הערכים המרביים של האמוניה שנמדדו בשיטה הקולורימטרית. ניתן לראות שבבטון שהוכן במעבדה לא הייתה השפעה לנוכחות המוספים, וערכי האמוניה היו הגבוהים ביותר. כאשר קדם להכנסת הבטון לעמודה ערבול ממושך, בין אם בערבול הבטון בניסוי השדה ובין אם בערבול של שעה במעבדה, התקבלו ערכים נמוכים יותר, ואת זאת ניתן לייחס לאמוניה הנפלטת מעל הערבול במהלך השעה הראשונה של הערבול. בבדיקה בשטח של הבטון הערך המרבי של ריכוז האמוניה היה אפסי, דהיינו לפחות סדר גודל אחד יותר נמוך מזה שנמדד במתקן המעבדתי. ההבדל הזה יוחס למהירות הרוח שהיא גבוהה יותר בשטח; למרות שבניסוי הנוכחי מהירות הרוח בשטח נחשבה מאד נמוכה, היא עדיין גבוהה מזו שבתנאי העמודה, כפי 50, ודי היה בהפרש זה כדי להקטין ביותר מסדר גודל את פליטת האמוניה. מגמות אלה תומכות בהערכה שהסימולציה במתקן המעבדתי מייצגת תנאים שהם הרבה יותר חמורים מהשטח, ולכן היא יכולה לשמש באופן אמין כאומדן על צד הביטחון.



ציור 23: ערכי הפליטה המקסימלית של אמוניה בתערובות ובתנאי הניסוי השונים

ג. בציור 24 מוצגים עקומי פליטת החום של התערובות השונות ועליהם מסומנות נקודות הזמן בהן התקבלו הערכים המרביים של ריכוז האמוניה במתקן המעבדתי. ניתן לראות שנקודות הזמן הן בסביבת סיום התקופה הרדומה, ממש בתחילת או לפני תחילת עליית השיא השני של פליטת החום. נקודת זמן זו היא בקרוב זמן תחילת ההתקשרות שבו מתחילות הריאקציות האינטנסיביות ואשר בו ערך ההגבה מגיע למקסימום, בתנאים של רוויית יתר של יוני מימת הסידן.



ציור 24: עקומי הטמפרטורה של כל התערובות מאפר מס' 2 אשר עליהן מסומנות נקודות הזמן שבהן התקבל ריכוז מרבי של אמוניה מעל הבטון במתקן המעבדתי

ד. תוצאות ניסוי השדה מצביעות על ערך אפסי של אמוניה באוויר, בשעה שהריכוז במתקן המעבדתי היה כ- 1.2 ppm שהוא בערך עשירית מחצי הערך הגבולי לבטיחות (25 ppm) וכשליש מסף הריח כפי שמדווח בספרות. מכאן שבתנאים הנוכחיים אנו נמצאים הרחק מתנאי הגבול במתקן המעבדתי ואף הרבה יותר מכך בשטח, אשר שם ערכי האמוניה נמוכים יותר מסדר גודל מאשר במדידה המעבדתית. יש מקום להמשך ניסויי השדה במיוחד בתנאי טמפרטורה גבוהים יותר בשטח כדי לקבל הערכות נוספות לגבי ההבדלים בין המדידה המעבדתית וריכוז האמוניה בשטח.

July 2016

## Use of Amonia Containing Fly Ash in Concrete

Arnon Bentur and Pavel Larianovsky  
National Building Research Institute  
Technion, Israel Institute of Technology

### 1. Introduction

The introduction of Selective Catalytic Reduction technologies for environmental control in the burning of coal in electricity producing plants has resulted in fly ash which contains ammonium. The source of the ammonium is ammonia in excess of the amount needed for the reduction of NO<sub>x</sub> (called ammonium slip), which is deposited as ammonium sulfate on the fly ash particles.

In the alkaline environment which is developed in Portland cement concrete, the ammonium sulfate reacts with calcium hydroxide and ammonia gas is released. Studies have shown that the presence of the ammonium sulfate in the fly ash does not affect the properties of the concrete<sup>1</sup> and the main concern which should be addressed is the effects of the ammonia gas evolved, on the health hazards of labors involved in the production and placing of the concrete.

The object of the present study was to evaluate in the lab the extent of emission of ammonia gas from concrete with ammonia containing fly ash to serve as a quality control method which could provide indication whether there might be health hazards involved and develop guidelines for the limiting values on the ammonium content in the ash which would assure safe utilization in the concrete.

The present report deals with the development and running of the lab system. These lab tests are to be complemented by site tests to resolve to what extent the lab simulation is adequate for predicting the actual performance.

### 2. Experimental

The lab simulation is a modification of an experimental set up reported by Rathbone and Robl<sup>2</sup>. It consists of a column (Figure 1) placed over a cylindrical mold (1 in Figure 1 and Figure 2), into which a 200mm thick concrete specimen is cast. Moist air is drawn over the concrete through the column at a controlled velocity through a system consisting of a pump, flow meter, valve and a trap, Figure 3. Measurements of the ammonia released over the concrete

---

<sup>1</sup> Koch and Prenzel, Tests on odour developments in the casting of a concrete screed using a NH<sub>3</sub> contaminated fly ash, Concrete Precasting Plant and Technology, issue 11, 1989

<sup>2</sup> R.F.Rathbone and T.L.Robl, A study of the effects of post-combustion ammonia injection on fly ash quality: Characterization of Amonia release from concrete and mortars containing fly ash as a pozzolanic admixture, University of Kentucky, 2001-2002

into the column is monitored by two different modes: (i) Direct measurement of the ammonia concentration in the column using a colorimetric tube (product of Kitagawa, Japan) which is inserted into the column (colorimetric method), and (ii) Measurement based on the standard exposure test of NIOSH 5015 which averages the ammonium concentration exposure over time, simulating respiration by human being, using a pump drawing air from the column into a tube which absorbs the ammonia (NIOSH method), Figure 4. The content of ammonia captured in the tube is determined later on by wet chemistry in a lab. On site such a system (pump + tube) is placed on a worker throughout the work period, between 2 to 8 hours. The direct measurement method (colorimetric method) provides the momentary concentration, while the NIOSH 5015 method provides average reading over the time interval during which the measurement is made. In a work place this is often the whole working day. In the current tests, intervals of 1.5 hours were taken to provide a profile of the change in the ammonia concentration emission over time.

The colorimetric measurement took place by placing the tip of the tube at the center of the column. The NIOSH method measurement include 4 tubes placed at 90° to each other, two above the pipe inlet (Figure 2) and two in between, with the tip of the tube being 100 mm inward from the column circumference. The NIOSH reported value is the average of the four. Comparison between the four measured values indicated uniform distribution of the ammonia concentration at the cross section of the column.

Preliminary runs were carried out to set the air velocity in the system. The intention was to set a very low velocity to simulate in the lab harsh conditions. A velocity of 0.15 meter/minute was chosen, which is considered as almost stationary air.





Figure 1: Testing system for monitoring ammonia emission from concrete; (1) concrete chamber (see Figure 2), (2) pipe into which ammonia is emitted and monitored, (3) connection between concrete chamber and pipe using an O ring, (4) air inlet and bubbling through water, (5) connection to pumping system (see Figure 3)



Figure 2: Concrete chamber before assembly into the pipe and air inlet



Figure 3: Pumping system and traps: (1) (2) traps through which air containing ammonia is passed, (3) pump which draws air through the system, (4) flow meter and valve to control air velocity



Figure 4: Ammonia monitoring systems mounted on the column

Four series of tests were carried out. In the first two the effect of the source of ammonia was studied and the mixed concrete was cast into the mold immediately after completion of the mixing, at about 20 minutes; measurements of ammonia release in the column commenced thereafter. The third series explored the effect of prolonged mixing, simulating ready mix concrete operation while the fourth series evaluated the effect of high temperature, 40°C relative to the 20°C lab test.

In the first series, ammonia was introduced into the concrete by adding  $\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$  salt, at a dose which would represent a contents of ammonia in the range of 2 to 100 mg/liter of mix water,

which is the range expected in fly ash containing ammonia concretes<sup>2</sup>. In this series the effect of air velocity was studied.

In the second series, fly ash having 180ppm of ammonia per kg was incorporated into the concrete, replacing cement at a 1:2 ratio, at contents 40, 80 and 120 kg/m<sup>3</sup> of fly ash.

In the fourth series the effect of processing, i.e. prolonged mixing simulating ready mix concrete operation was evaluated. The concrete was mixed for one hour before being cast into the mold. During the mixing period ammonia content in the air over the mixer was monitored; after placing in the mold and in the column the monitoring continued, but in the column, under the stream of wet air of controlled velocity.

In the fourth series, effect of temperature was explored by running the whole system in a climatic chamber at 40°C. All the tests of the first three series took place in a lab at 20°C.

The concrete studied in the third and fourth series were the ones having 80 kg/m<sup>3</sup> of fly ash, as the 80 kg fly ash mix in the second series.

The slump of all the concretes was in the range of 140 to 150mm. Their composition is provided in Table 1.

Table 1: Composition of the concretes

	Cement, kg/m <sup>3</sup>	Fly ash kg/m <sup>3</sup>	Water kg/m <sup>3</sup>	Coarse aggregate kg/m <sup>3</sup>	Medium aggregate kg/m <sup>3</sup>	Fine aggregate kg/m <sup>3</sup>	w/c ratio	W/b ratio
Reference	316	0	184	580	854	481	0.58	0.58
40 kg fly ash	284	41	193	557	821	516	0.68	0.59
80 kg fly ash	259	80	190	548	808	491	0.73	0.56
120 kg fly ash	240	120	190	549	808	473	0.79	0.53

The cement was type I and the fly ash was obtained from VGB powerTech at Deilbachtal 173, 45257 Essen-Kupferdreh, Germany. Special effort was made to obtain a high ammonia content fly ash to be able to run in the test a range of ammonia contents in the concretes. The ammonia content of the fly ash was 180 ppm and its chemical composition is provided in Table 2.

Table 2: Composition of the fly ash

Compound	Content, % wt.
Silica+ Alumina+ Iron oxide	89.82
Soluble phosphate, mg/kg	0.33
Alkalis as Na <sub>2</sub> O	0.335
Cl	0.0025
SO <sub>3</sub>	0.61
MgO	0.81
Free CaO	0.017
LOI	3.88
Moisture content	0.04

The concrete strength values at 28 days after continuous curing at 20°C (first week in water and thereafter in lab environment) were 44.4 MPa for the reference 0.58 w/c concretes, and

39.6, 33.5 and 29.9 MPa for the 0.63 effective w/c ratios with 40, 80 and 120 kg/m<sup>3</sup> fly ash, respectively. The concrete prepared at 40°C (80 kg/m<sup>3</sup> fly ash mix) attained 28 days compressive strength of 38.5 MPa when cured continuously at 40°C, and 33.6 MPa when cured at 40°C for the first day and thereafter at 20°C. The higher strength values of the high temperature curing, 38.5 (continuous at 40°C) and 33.6MPa (first day at 40°C and thereafter at 20°C), compared to the 29.9 MPa for the continuous 20°C curing, clearly reflect the pozzolanic activity of the fly ash.

The contents of ammonia per kg of mix water in the concretes is presented in Table 3. The expression of the ammonia content in terms of the ratio to mix water is based on conclusions by Rathbone and Robl<sup>2</sup> which showed that this seems to be the more dominant parameter controlling the value of ammonia emitted to the air from ammonia containing concretes.

Table 3: Amonia content in concrete calculated as mg ammonia per liter of mix water

Amonia source	Added salt	Added salt	40 kg/m <sup>3</sup> fly ash	80 kg/m <sup>3</sup> fly ash	120 kg/m <sup>3</sup> fly ash
Amonia content, mg/liter mix water	2.2	22.3	33.6	67.3	100.9

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Effect of ammonia content and source

The results of the first two series of tests are presented in Figure 5, with the source of ammonia being either salt added to the concrete mix or fly ash incorporated as partial replacement to the cement and the fine aggregate. In both cases a peak could be observed during the first few hours, while after 24 hours the ammonia emission was decayed considerably.

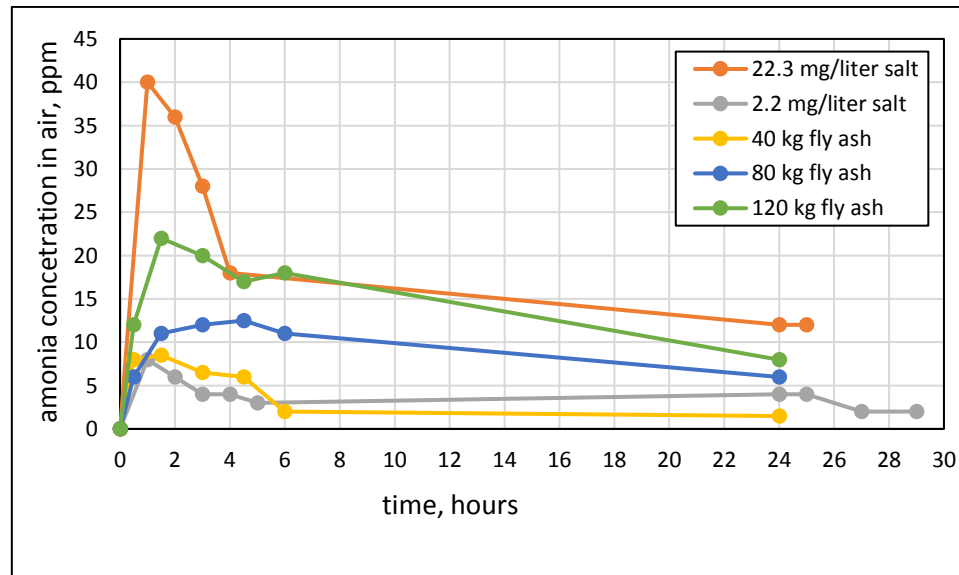


Figure 5: Amonia concentration in air measured by the colorimetric method

It can be seen that the peak of ammonia was much sharper when the ammonia source was the added salt, and also, the levels of ammonia emissions were much higher for the salt, as

can also be observed when the peak emission is plotted against the ammonia content in the mix, Figure 6.

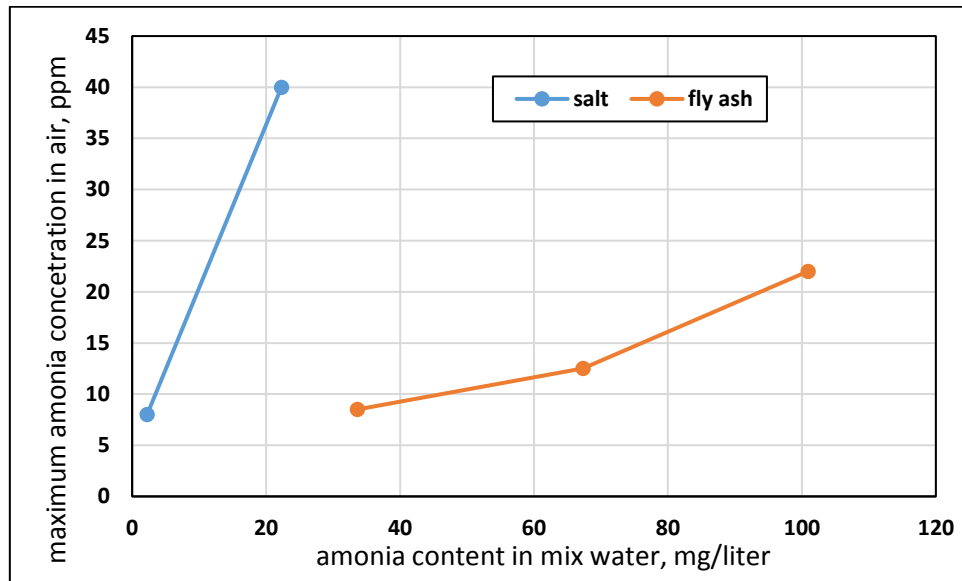
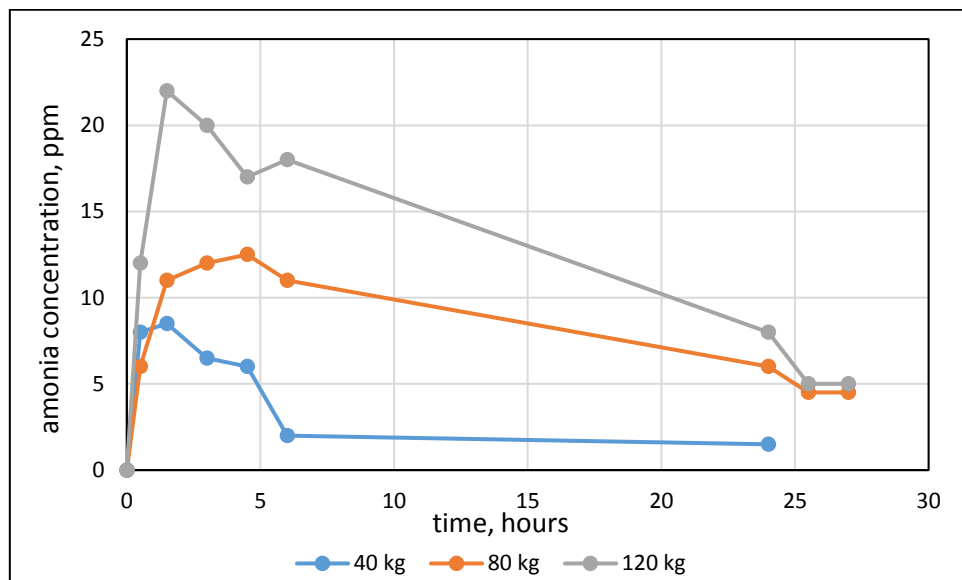
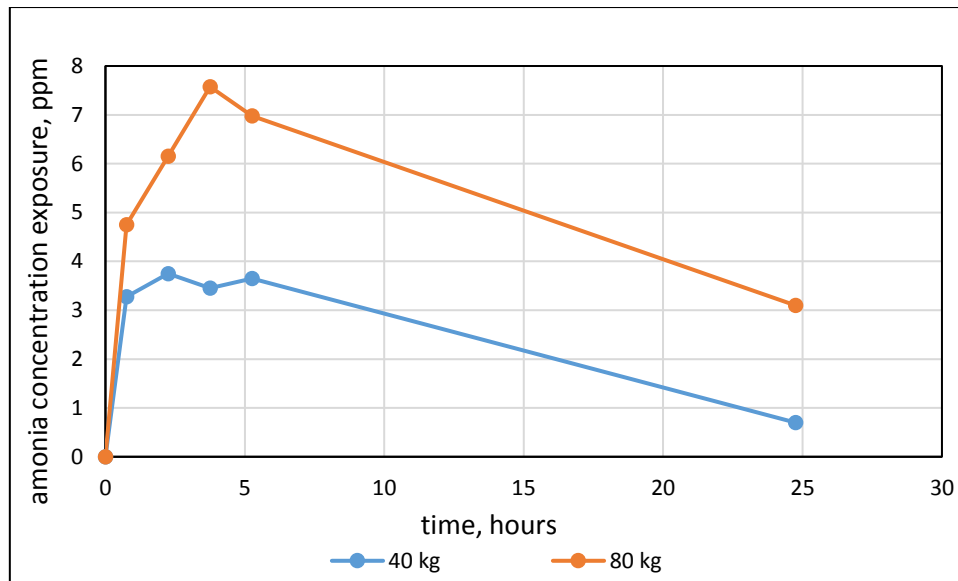


Figure 6: Ammonia concentration in air measured by the colorimetric method as a function of the ammonia content in the concrete and its source, salt or fly ash

The ammonia curves obtained by monitoring the emission using the NIOSH emission curves are presented in Figure 7a for the fly ash mixes. The trend is similar to that monitored by the colorimetric test tubes (Figure 7b), namely a peak during the first few hours which gradually decays towards 24 hours.



(b)



(b)

Figure 7: Ammonia concentration – time curves for mixes with fly ash, measured by the (a) NIOSH method, (b) colorimetric method

Although the trends are similar, it seems that the level of ammonia measured by the colorimetric tube (instantaneous measurement) is consistently higher than that obtained by the NIOSH method. This is clearly demonstrated in Figure 8, where the concentrations of the two tests are compared, showing a significant linear relation where the colorimetric test yields values which are higher by about 55%.

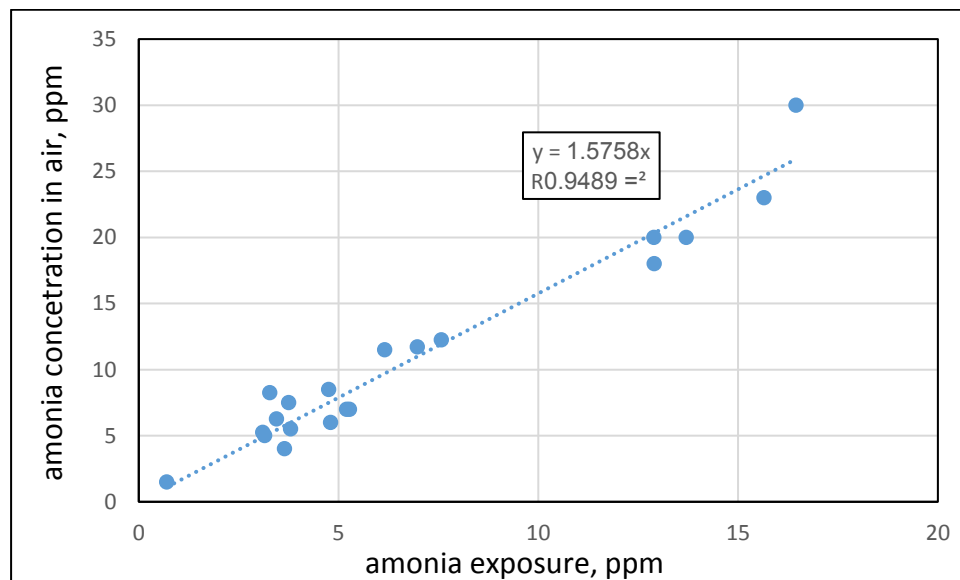


Figure 8: Relation between the ammonia concentration measured by the NIOSH method (ammonia exposure) and the colorimetric method (ammonia concentration in air)

Analysis of the results in term of correlations between the peak of the ammonia concentrations over the concrete and the content in the mix water of the concrete are presented in Figure 9. Although the data is limited in terms of the amount of concentration points, it seems that there is a linear correlation between the two parameters, which is similar

in nature to a much more extensive investigation done in the US by Rathbale and Robl. The relation suggest that for the colorimetric exposure, 10 ppm ammonia in the air is induced by 50 mg/liter of ammonia in the mix water, and the air concentration level will be about seems to be smaller by about 6.5 ppm for the NIOSH test. These are of course indicative values and more extensive measurement are required to derive a more precise relations.

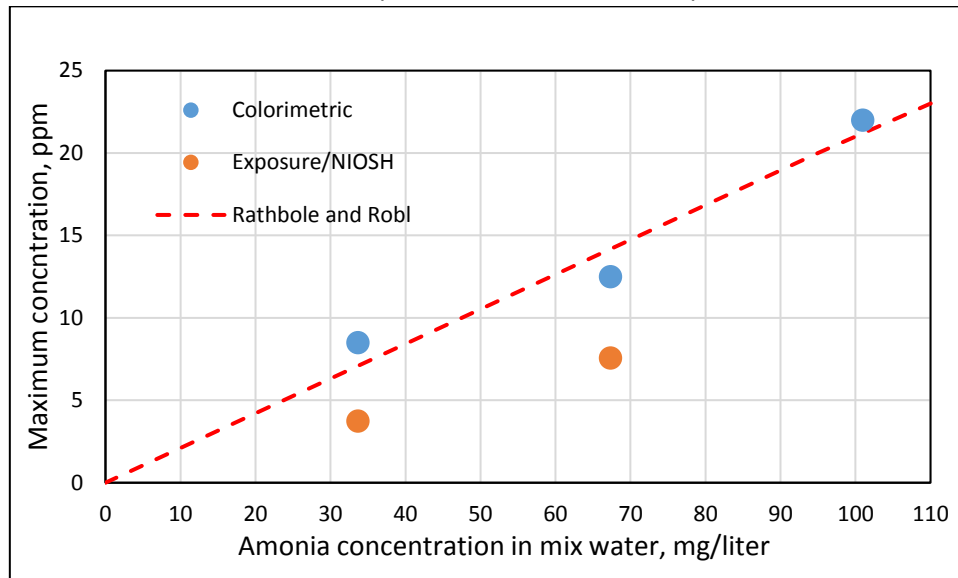
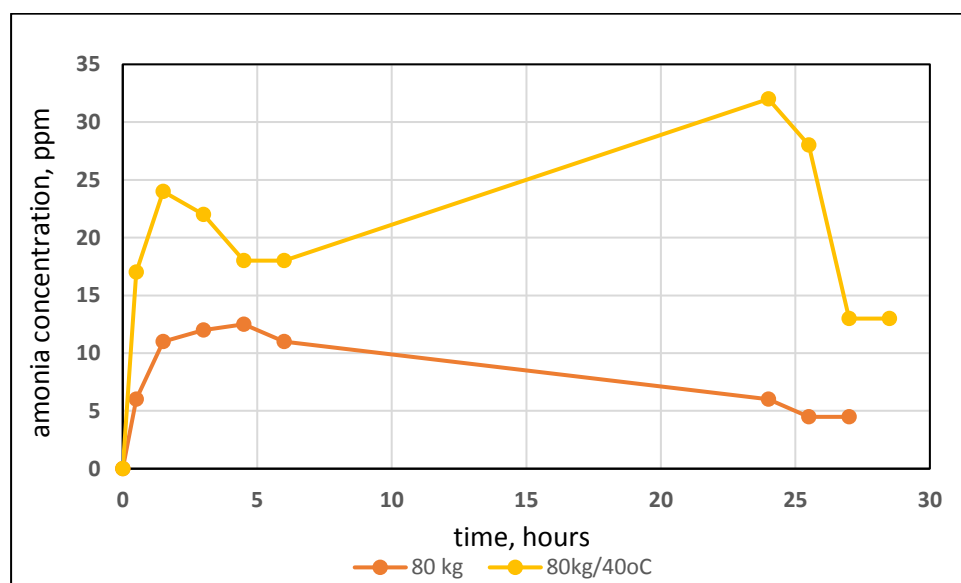


Figure 9: Relations between ammonia content in the mix water and the maximum concentration level in the air above the concrete.

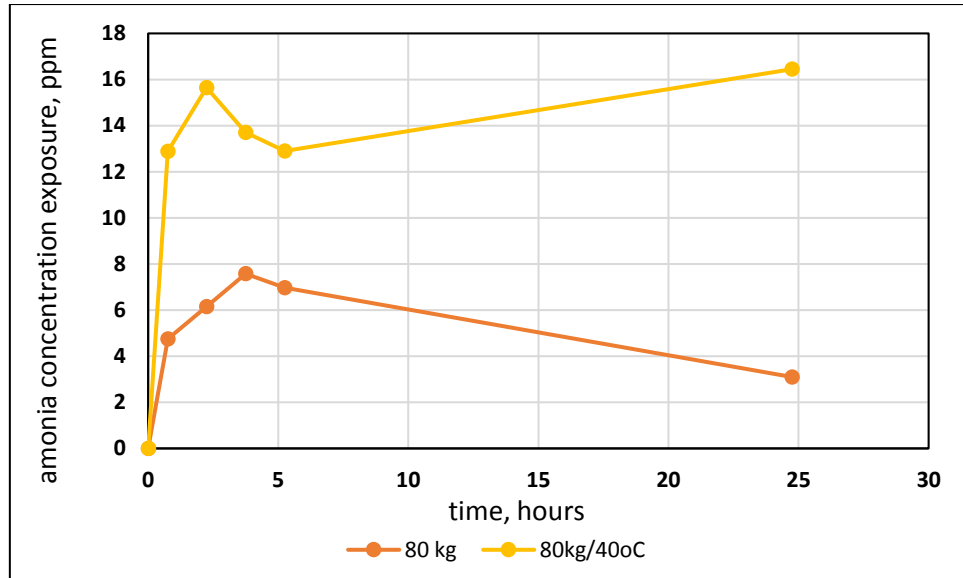
### 3.2 Effect of temperature

The effect of the temperature was obtained by studying the emission of a mix with 80 kg of fly ash containing ammonia at 20 and 40°C. For that purpose the whole set up was moved from the 20°C lab to a 40°C climatic chamber, where the mixing as well as the emission monitoring were taking place. The results for the colorimetric and NIOSH monitoring are presented in Figure 10.



(b)





(a)

Figure 10: Effect of temperature on ammonia concentration – time curves for concrete mix with 80 kg fly ash measured by the (a) NIOSH method , (b) colorimetric method

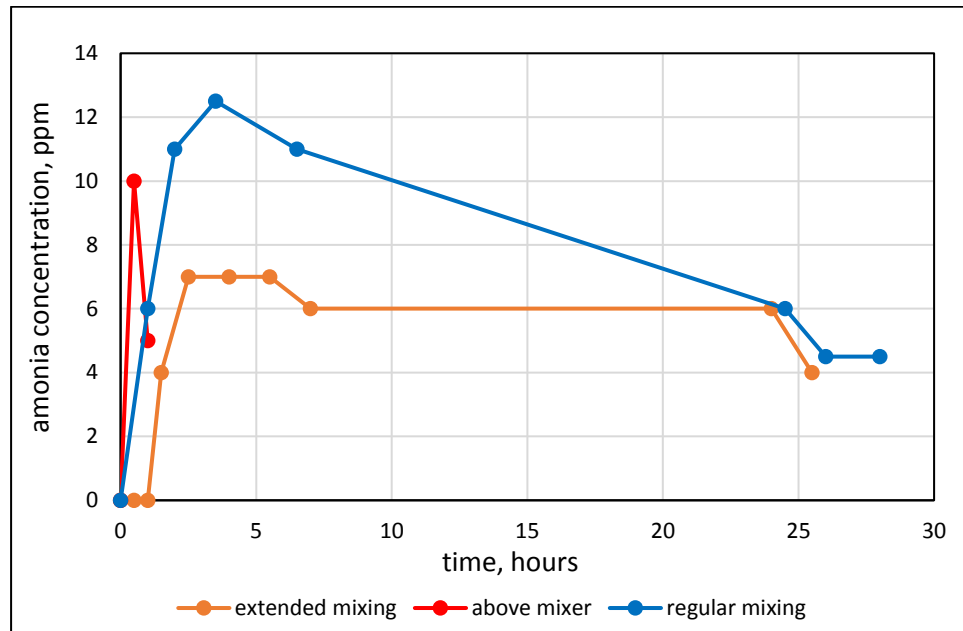
The trends in the two monitoring systems are very similar: a peak during the first few hours at the two temperatures, but at 24 hours at the 40°C environment there seems to be a surge in the ammonia emitted which thereafter decays. This surge might be due to build-up of temperature within the column, due to the exothermic reaction of hydration which usually peaks after 8 to 12 hours. In the 20°C environment it may cool down but in the 40°C chamber the dissipation of heat is much slower. To verify this explanation a future test is planned which will include monitoring of the temperature within the concrete itself.

### 3.3 Effect of prolonged mixing

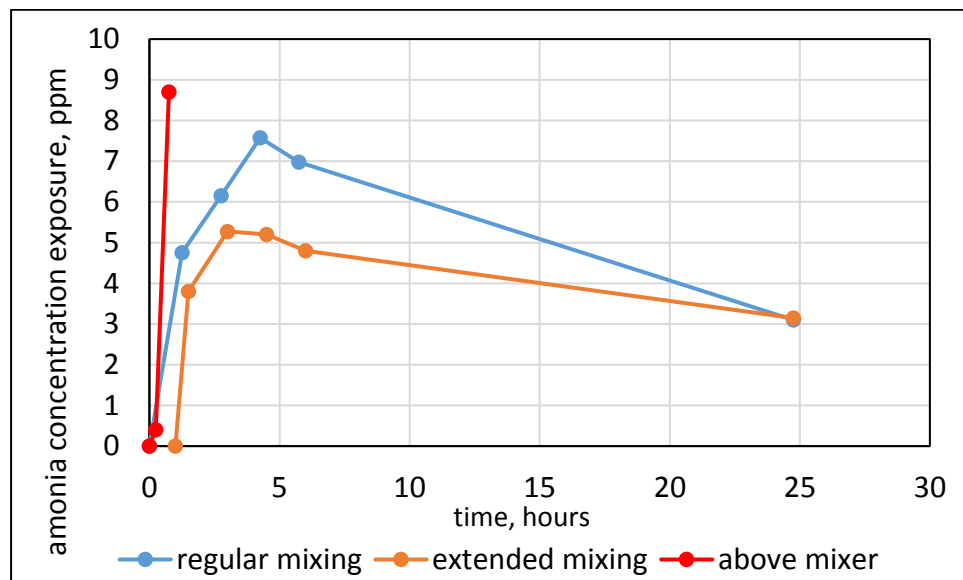
The tests reported in the previous sections represent lab conditions in which concretes are cast immediately after completion of mixing into the chamber representing a closed space. In practice, when ready mixed concrete is being applied, there is a need to take into account the influence of prolonged mixing in the truck, of about 1 hour, during which the concrete is continuously agitated in the open environment before being placed in a relatively confined space. This influence was simulated in this series of test in which the concrete was mixed for one hour in the lab in a free fall drum mixer, in a relatively open space, and thereafter cast into the pipe. During both time periods the ammonia release was monitored, during the first hour of mixing just above the free fall drum mixer opening, about 0.5 m above it, and thereafter in the pipe as in previous tests.

The results for the two periods are presented in Figure 11 and comparison is made with the previous lab series. During the first stage of mixing there is a sharp rise in the ammonia content, to levels which are similar to the peak obtained when the concrete is cast directly into the pipe after mixing. During the second stage, when the concrete after the prolonged mixing is cast into the pipe, the ammonia-time profile is similar in nature to that of the immediately cast concrete, namely a peak after the first few hours, but the levels of ammonia concentrations are lower. This behavior suggests that the ammonia emitted during the

prolonged mixing comes on the expense of the ammonia which would have been emitted during casting.



(b)



(a)

Figure 11: Effect of prolonged mixing on the ammonia concentration – time curves for concrete mix with 80 kg fly ash measured by the (a) NIOSH method, (b) colorimetric method

#### 4. Conclusions

- The ammonia emitted from fly ash in concrete is smaller than the level obtained when a similar content is added directly as an ammonia containing salt. This probably

reflects a dependency on the source of the ammonia, with the one coming from fly ash is less forthcoming with respect to discharge of ammonia gas.

- The trends of discharge of ammonia are similar when monitored by the NIOSH standard procedure and the colorimetric direct tests. Yet, the colorimetric test shows consistently values which are higher by about 50%. At this stage we have no explanation for this difference but the consistent trends and quantitative relations indicate that the colorimetric test which is easier to perform can serve as a reliable monitoring technique.
- The effect of temperature on the emission of ammonia is quite significant, resulting in doubling of the levels discharged when the temperature increases from 20 to 40°C. This increase however is smaller than expected on the basis of the rule of thumb that 10°C increase in temperature is associated with doubling of reaction rates.
- There is room to suggest that the test protocol conducted here represent conditions which would be harsher than the ones on field because of combination of several factors: almost stationary air velocity, confinement of the emitted gas in the column and smaller ability of dissipation of the heat build-up. To some extent this is verified by the results of the simulation of extended mixing. Further verification is expected to be obtained when the planned site tests will be carried out.
- There seems to be a linear relation between the ammonia content in the concrete, calculated as the content in the mix water and the maximum concentration in the air above the concrete, similar in nature to the correlation reported by Rathbone and Robl. Indicative values for 50 mg/liter ammonia in the mix water are 10 ppm and 6.6 ppm maximum concentration in the air above the concrete for the colorimetric and NIOSH measurements, respectively.
- It should be noted that in spite of the expected harsher conditions and the high level of ammonia in the ash, the level of ammonia concentration did not pass half of the threshold value recommended which is 25 ppm.
- The results of this lab study, when combined with the next phase of site studies could validate to what extent the lab procedures developed here could serve as quality control method with regards to ammonia release in concrete with respect to health hazards.

## נספח ב'

13.2.2017

**ניסוי שדה לניטור פליטת אמוניה מבטון המכיל אפר פחם שיוצר במתקן SCR בחברת חשמל  
בישראל (22-23/1/2017)**

פבל לריאנובסקי, ארנון בנטור  
המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון

שמואל גריידי, נדב זק  
המעבדה לבריאות וגהות תעסוקתית בע"מ

**1. רקע**

במסגרת הפעילות לקליטה ויישום בתעשיית הבטון של אפר פחם המכיל אמוניה המתקבל בתהליך הייצור במתקן SCR נערך בטכניון מחקר שבמסגרתו פותח מתקן מעבדתי המאפשר סימולציה של תהליך הפליטה של אמוניה מתוך בטון. במתקן זה הבטון נוצק בתחתית עמודה בגובה של חדר, כאשר מעל לבטון שבתחתית מוזרם אוויר רווי בקצב של "כמעט אוויר עומד", ונערכות מדידות לקביעת ריכוז האמוניה בעמודה בתלות בזמן. המדידות בוצעו באמצעות בדיקה קולורימטרית בשפופרות מיוחדות וכן גם בבדיקה תקנית לפי NIOSH המקובלת בתחום הגהות והבטיחות בעבודה. ההערכה היא שההרצה במתקן המעבדתי מייצגת תנאים שהם חמורים יותר מהשטח וזאת בעיקר בגלל מהירות רוח המוגדרת ככמעט עומדת, כך שכל האמוניה הנפלט מתרכז בעמודה. תיאור המתקן וניתוח התוצאות המתקבלות בו, תוך שימוש באפר מגרמניה בעל תכולת אמוניה גבוהה, מוצג בנספח לדו"ח זה.

במהלך המחקר פותחו קשרים כמותיים בין תכולת האמוניה באפר שבבטון ובין הריכוז באוויר מעל הבטון, אשר מתוכם ניתן לחזות את האמוניה שתפלט מהבטון בתלות בהרכבו (תכולת האפר ומי התערובת) ובתלות בתכולת האמוניה באפר. מקשרים אלה ניתן להעריך שכל עוד נשמרים הכללים המקובלים באירופה שתכולת האמוניה באפר היא פחות מ- 50ppm עד 100ppm לא צפויה פליטה מהבטון המהווה סיכון בריאותי ובטיחותי.

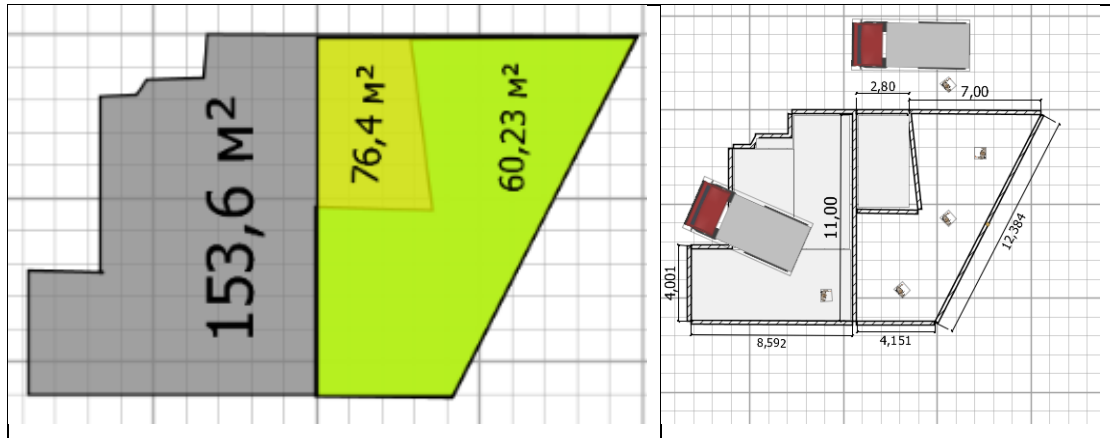
עם התחלת ייצור אפר הפחם במתקן SCR בחברת חשמל בארץ החל השלב השני של המחקר שמטרתו לאפיין את החומר המתקבל בייצור עצמו, גם בבדיקה המעבדתית וגם בניסויים בשטח של ייצור ויישום בטון בקנה מידה מלא, כדי לאשש את המסקנות המתקבלות מהבדיקה המעבדתית. הכוונה הייתה לבצע בדיקות בשטח תוך תאום עם יצרני בטון מובא במסגרת פרויקטי בנייה רגילים. בפועל הסתבר שלא ניתן לתאם מהלך כזה בגלל בעיות לוגיסטיות של התארגנות בשטח לביצוע בדיקות לבקרת הפליטה של האמוניה. על רקע זה הוחלט לסטות מהתוכנית המקורית ולבצע את ההדגמה בקנה מידה מלא באתר של המכון הלאומי לחקר הבנייה אשר שם יש אפשרות להתארגן לביצוע מהלך מתוכנן ומבוקר. מהלך זה כלל הכנת אתר מתאים שבו ניתן לצקת משטחי בטון בשטח של כ- 100 מ"ר תוך התארגנות לביצוע בדיקות מסודרת של הפליטה של האמוניה בשטח מעל המשטח, ובמקביל גם במתקן המעבדתי. הדו"ח הנוכחי מתאר את הכנת התשתיות לניסוי זה ואת התוצאות של היציקה שבוצעה ב-22 לינואר 2017.

## 2. תשתית לניסויי הדגמה בקנה מדה מלא

התשתית שהוכנה לניסויי מתוארת באיורים 1 ו-2. היא כוללת קירות תומכים שנבנו במיוחד המקיפים משטח שבו ניתן לצקת שלוש שכבות של בטון בעובי כ- 20 ס"מ כל אחת בשטח של כ- 100 מ"ר. המשטח תוכנן כך שתהיינה דרכי גישה לערבלים הניידים ללא צורך במשאבה (איור 2).



איור 1 : צילום של שלב בניית הקיר התומך והמשטח הבנוי שהוכן לצורך ניסויי ההדגמה

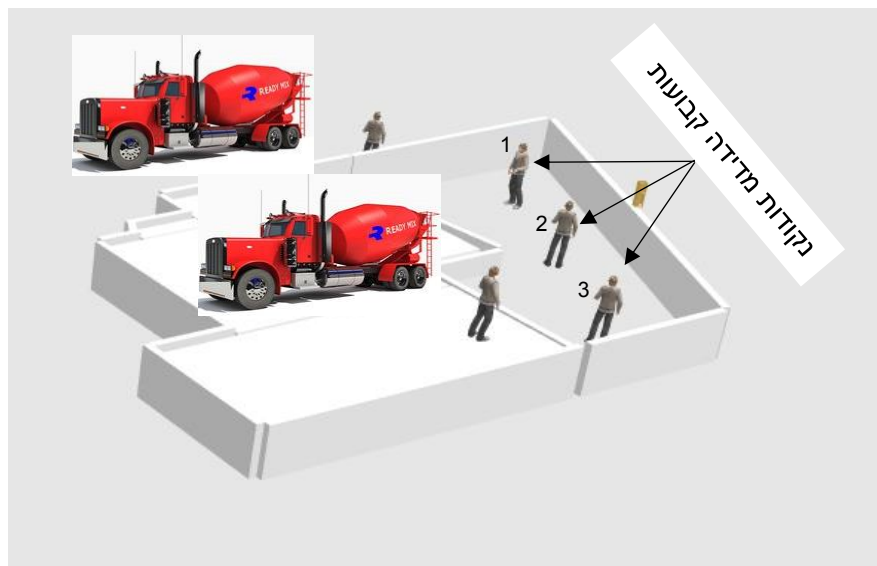


משטח בצבע ירוק  $60.2 \text{ מ}^2$  - יציקה מס' 1

משטח בצבע צהוב וירוק  $76.4 \text{ מ}^2$  - יציקה מס' 2

משטח בצבע צהוב, ירוק ואפור  $153.6 \text{ מ}^2$  - יציקה מס' 3

איור 2: מידות המשטח שהוכן לשלוש יציקות ודרכי הגישה לערבלים הניידים  
תכנון של מערך הבדיקות לניטור פליטת אמוניה ביציקה עצמה מתואר באיור 3. נקודות המדידה מוצגות על ידי הדמויות שבאיור 3: שלוש נקודות מדידה קבועות בתוך אזור היציקה עצמו (מסומנות במספרים 1, 2, 3) ומדידה באמצעות המכשור התקני (משאבה + שפופרת לספיחת אמוניה) המותקנת על גבי שני אנשי צוות המכון האחראים על הביצוע של פריקת הבטון ופיזורו.



איור 3: מבט כללי ותוכנית לתאור מהלך היציקה הראשונה במשטח; נקודות מדידה קבועות (1,2,3); הדמויות באיור מייצגות את נקודות המדידה (1, 2, 3) – נקודות מדידה קבועות מעל הבטון; הדמויות שאינן מסומנות במספרים הן של הצוות המופקד על הביצוע של היציקה עליו מותקן ציוד ניטור לפי תקן (NIOSH)

נקודות המדידה הקבועות מוקמו באמצעות מערכת של חוטי תלייה עם גלגלות (איור 4) כך שניתן לתלות עליהן את מכשירי המדידה (איור 5 – מדידה לפי תקן NIOSH; איור 6 – מדידה בשפופרת קולורימטרית) ולהסירם ולהחליפם בפרקי הזמן הנדרשים. אלה אמורים לייצג פועלים הנמצאים כל הזמן במשטח הבטון, בשעת היציקה עצמה ובמהלך כל היום שלאחר מכן. גובה נקודת המדידה מעל פני הבטון היצוקים נקבע ל-1.20 מטר.

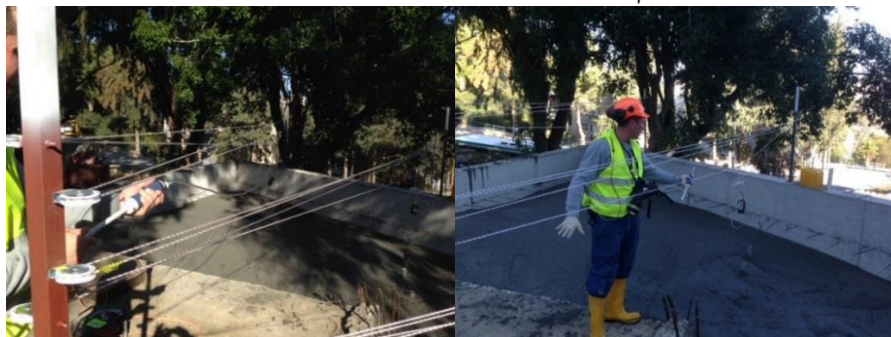




איור 4 : מערכת כבלים לתלייה של מכשירי הניטור (נקודות הניטור הקבועות)



איור 5 : מכשיר הניטור לפי תקן NIOSH התלוי במתקן מעל נקודת המדידה הקבועה, מותאם לגובה של פועל הכורע מעל הבטון



איור 6 : מדידה באמצעות השפופרת הקולורימטרית, לאזור עם גישה מחוץ למשטח ובאמצעות צינורית לנקודה קבועה בתוך המשטח

המשטח עצמו היה פתוח לסביבה דבר המאפשר פיזור של האמוניה. כדי לקבל אינדיקציה להשפעה של כיסוי, מוקם בצד המשטח צינור אנכי אשר לתוכו נוצק בטון והוא כוסה ביריעה מחומר פלסטי (איור 7). נערכה מדידה של ריכוז האמוניה באוויר מעל הבטון בצינור, מתחת לכיסוי.



איור 7 : צינור שלתוכו נוצק בטון וכוסה לאחר מכן

ניטור נוסף התבצע במפעל הבטון עצמו באמצעות ניטור לפי תקן NIOSH של המפעילים במפעל וכן התקנתו של מתקן הניטור על שני נהגים, מתחילת ההעמסה עד סיום הפריקה של הבטון לנהג אחד (ערבל מס' 1), ולנהג שני (ערבל מס' 3) יד חזרתו למפעל הבטון ולאחר שטיפת הערבל. בנוסף נערך במפעל ניטור באמצעות השפופרת הקולורימטרית. מערבל מס' 3 נלקחה מנה של בטון לצורך בדיקות תקניות של עבירות, משקל מרחבי וחוזק, ומבטון זה גם נוצק מדגם להרצה במתקן הסימולציה. התבנית שבה נוצק הבטון למטרה זו, שבה רואים את פרטי הזרמת האוויר וחוטי תרמוקפלים, מוצגת באיור 8. במקביל לכל אלה הייתה הערכות לניטור סביבתי שוטף של טמפרטורה, לחות ומהירות רוח.



איור 8 : תבנית ליציקת הבטון אשר מעליו ימוקם מתקן הצינור לצורך הסימולציה המעבדתית



### 3. מהלך הניסוי

הניסוי תוכנן מלכתחילה עם תערובת שבה תכולת אפר פחם היא 120 ק"ג/מ"ק. לאור העובדה שהאפר שמתקבל במתקן SCR של חברת חשמל הוא באופן עקבי בתקופה זו בעל תכולה נמוכה של אמוניה, 4ppm, הוחלט לבצע את הניסוי בבטון המכיל 160 ק"ג/מ"ק אפר כדי לקבל השפעה כמה שיותר גדולה של האמוניה.

הניסוי תוכנן לביצוע על ידי 3 מנות של 7 מ"ק כל אחת. עם ההגעה לטכניון בוצעה פריקת הבטונים כפי שרואים בציור 9 לגבי המנה הראשונה, ערבול מס' 1.



איור 9 : יציקת הבטון במשטח

ההעמסה של הערבול הראשון במפעל החלה בשעה 06: 55 ולוח הזמנים של הפעילויות היה כלהלן :

- ערבול ראשון : התחלת ההעמסה במפעל 06: 55, יציאה 07: 10, הגעה לטכניון 07: 50, סיום פריקה 08: 00
- ערבול שני : יציאה מהמפעל 07: 29, הגעה לטכניון 08: 05
- ערבול שלישי : יציאה מהמפעל 07: 45, הגעה לטכניון 08: 30
- סיום יציקת המשטח בטכניון : 09: 10
- התחלת הניטור על גבי המשטח : 08: 00
- התחלת הניטור במתקן המעבדתי : 09: 00

תוצאות של הניטור של הטמפרטורה, לחות ומהירות זרימת האוויר באמצעות המכשור של המעבדה לבריאות וגהות תעסוקתית ושל המכון הלאומי לחקר הבנייה, אשר בוצעו במקביל מוצגים בטבלה 1 ובאיור 10.

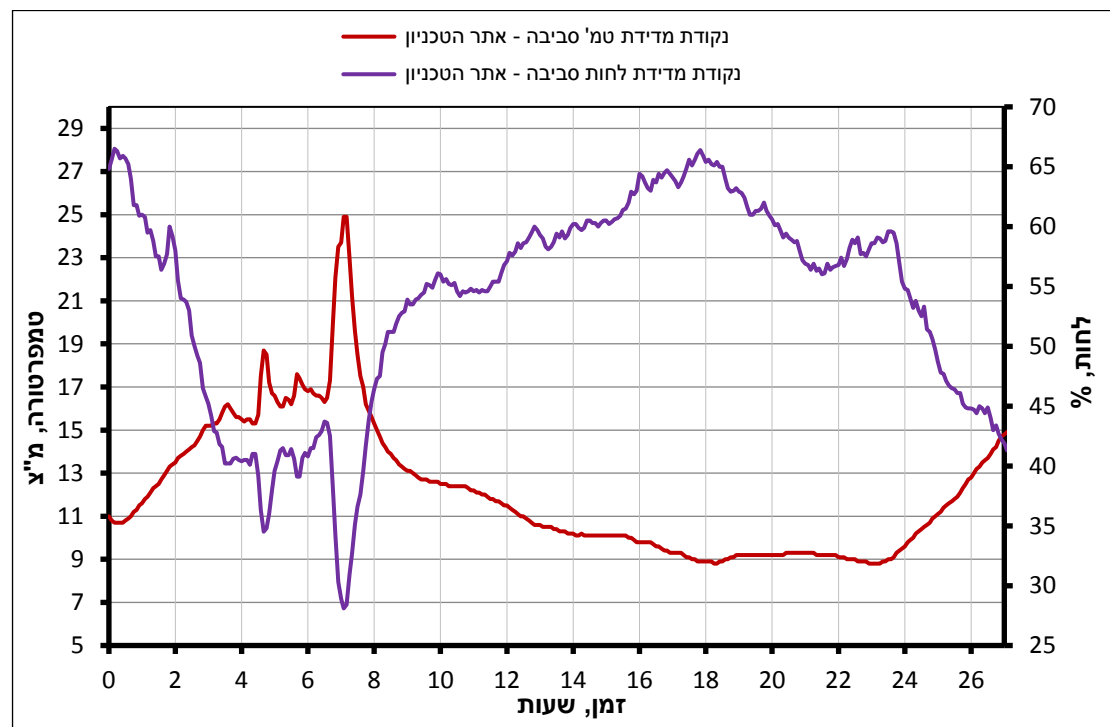
מהירות זרימת האוויר בשטח, על גבי משטח הבטון נעה בטווח שבין 0.27 ל- 0.76 מטר/שנייה, הנחשבת למהירות רוח נמוכה מאד. מהירות זרימת האוויר במתקן הסימולציה היא 0.15 מטר/דקה

(0.0025 מטר/שנייה), הנחשבת כמאפיינת של אוויר "כמעט עומד" והיא נמוכה בערך פי 50 מזו של הזרימה בשטח.

בגלל מיקום אתר היציקה, כיווני זרימת האוויר השתנו ובאתר נוצרו מערבולות אוויר שגרמו לתנועות אוויר לכל כיוון אפשרי, עד כדי כך שמניפות השבשבת עמדו לפרקי זמן קצרים, והחלו להסתובב בכיוון הנגדי.

טבלה 1: ניטור טמפרטורה, לחות יחסית ומהירות זרימת אוויר על יד המעבדה לנחות

שעה	טמפרטורה מ"צ	לחות יחסית %	מהירות זרימת אוויר מטר/שנייה
08:00	10.8	75.8	0.36
09:00	13.3	62.6	< 0.01
10:00	15.5	55.7	0.27
12:30	17.3	50.7	0.45
14:00	14.7	57.1	0.76



איור 10: ניטור טמפרטורה ולחות באמצעות ציוד של המכון הלאומי לחקר הבנייה מעל משטח הבטון

#### 4. הרכב הבטון ותכונותיו

מדגמי בטון נלקחו מהערבל השלישי והם שמשו לקביעת תכונות הבטון הטרי והקשוי וכן להכנת מדגם לבדיקת פליטת אמוניה במתקן הסימולציה המעבדתי.

הבטון היה עם גרגיר מרבי של 19 מ"מ, בדרגת חוזק ב- 30 ודרגת סומך F4.

פרמטרים של הרכב הבטון ותכונותיו מוצגים בטבלה 2 עבור הבטון מערביל מס' 3, אשר אליו הוספו 40 ליטר מים באתר הטכניון כדי לקבל סומך גבוה.

טבלה 2 : הרכב הבטון ותכונותיו

חוזק לחיצה בגיל (ימים), מגפ"ס						תכולת אוויר, ליטר/מ"ק	סומך, מ"מ	משקל מרחבי מדוד, ק"ג/מ"ק	טמפרטורת הבטון, מ"צ	הרכב הבטון, ק"ג/מ"ק			
90	60	28	14	7	1					אגרגטים	מים	אפר	צמנט
		39.4	33.9	24.8	9.1	1.5	230	2300	18.2	1659	191	160	290

## 5. ניטור במפעל הבטון המובא

הניטור במפעל התבסס על קביעת האמוניה באוויר בסמוך למתקן הערבול והערבול הנייד באמצעות השפופרת הקולורימטרית (איור 11) וכן ניטור של המפעילים באמצעות מכשור על פי תקן NIOSH.



(ג)

(ב)

(א)

איור 11 : ניטור במפעל הבטון (א), אמוניה בבדיקה הקולורימטרית (ב) וטמפרטורה (ג)

בנוסף לעובדים אלה נערך ניטור של שני נהגים של הערבילים הניידים (מס' 1 ומס' 3), החל מזמן הטעינה וגמר עם פריקת הבטון באתר היציקה בטכניון.

הניטור באתר על פי תקן NIOSH, שבו הוצמדו לעובדים משאבות עם שפופרת לספיחת אמוניה, כלל את המרכיבים הבאים :

- מתקן דגימה אחד שהוצמד למפעיל המתקן
- מתקן דגימה שהוצב בסמוך לתחתית הערביל בעמדת מפעיל הערביל
- מתקן דגימה אחד לדוגם שלקח דגימת בטון מערביל מס' 3 לצורך בדיקות שגרתיות
- מתקני דגימה שהוצמדו לנהגים של ערביל מס' 1 ומס' 3, לכל נהג שני מתקנים, האחד למדידה מתחילת תהליך הטעינת הערביל ועד גמר פריקת הבטון באתר הטכניון לנהג אחד (ערביל מס' 1), ולנהג השני (ערביל מס' 3) עד חזרתו למפעל הבטון ולאחר שטיפת הערביל. המתקן השני שמש לניטור במהלך פריקת הבטון באתר בטכניון במשך 15 דקות (מדידת STEL)

בשיטה זו הכמות הקטנה ביותר של אמוניה שניתן לזהות בבדיקת מעבדה של החומר בשפופרת אליה נספח האמוניה היא 0.5 מק"ג. לכן רגישות המדידה תהיה גבוהה יותר ככל שנפח הדגימה של

האוויר (תלויה במשך הבדיקה) יהיה גדול יותר. בבדיקות הנוכחיות משך הזמן נע בין 15 ל- 123 דקות, דהיינו נפח אוויר שבין 1.5 ל- 15 ליטר ורגישות מדידה בטווח שבין 0.05 ל- 0.5ppm.

הניטור של האמוניה באוויר באמצעות הציוד הקולורימטרי התבצע בצורה שמאפשרת קבלת רגישות מרבית, דהיינו מדגם אוויר של 500 סמ"ק, עם רגישות של 0.1ppm. מרבית הבדיקות לא הראו נוכחות של אמוניה, דהיינו נתנו קריאה של אפס, והן הוצגו על כן כפחות מ- 0.1ppm. הטמפרטורה הייתה 8.9 מ"צ בתחילת ההעמסה של הערב הראשון. התוצאות הן כלהלן:

- ערבל מס' 1 ו-3 מדידה באיזור פתח כניסה של חומרים ואגרטים לערבל: פחות מ- 0.1ppm
- מפעל בטון, מקום דגימה והכנת מדגמי בטון עבור בדיקה (חוזק לחיצה): פחות מ- 0.1ppm
- 10 ס"מ מעל המריצה שבה היה הבטון שנלקח לצורך הכנת המדגמים: 0.5 ppm

תוצאות אלה מראות שהריכוז של האמוניה באוויר בכל נקודות המדידה הוא אפסי, ורק כאשר מתקרבים לפני הבטון, 10 ס"מ ממנו יש תכולה נמוכה של אמוניה בשיעור של 0.5 ppm.

התוצאות של הניטור של המפעילים והנהגים מוצג בטבלה 3.

טבלה 3: תוצאות הניטור לאמוניה של המפעילים בתחנת הבטון והנהגים לפי תקן NIOSH

תפקיד	ריכוז אמוניה, ppm	משך בדיקה, דקות
מפעיל	< 0.1	60
עמדת מפעיל בתחתית הערבל	< 0.1	60
דוגם בטון מערבל מס' 3	< 0.2	43
נהג ערבל מס' 1	< 0.05	112
נהג ערבל מס' 1	< 0.2	15
נהג ערבל מס' 3	< 0.1	123
נהג ערבל מס' 3	< 0.5	15

המשמעות של כל התוצאות האלה היא שבטווח הרגישות של הבדיקה (נפח מדגם האוויר ויכולת זיהוי של 0.5 מק"ג) ריכוז האמוניה היה אפסי.

## 6. ניטור באתר היציקה בטכניון

הניטור באתר היציקה בטכניון התבצע בשלושה אופנים: ניטור של האוויר באמצעות הבדיקה הקולורימטרית, ניטור של אנשי צוות הטכניון אשר עבדו על גבי המשטח בפיזור הבטון וניטור של האוויר בנקודות המדידה הקבועות בבדיקה לפי תקן NIOSH, אשר נמשכה על פני 90 דקות שכללו את כל מהלך היציקה באתר.

הניטור של האוויר במהלך כל יום היציקה ולמחרת לא הראה נוכחות של אמוניה, דהיינו קריאה "0", וזאת ברגישות מדידה של 0.1ppm.

ניטור של האוויר מעל הצינור שכוסה ביריעה מחומר פלסטי מיד לאחר סיום היציקה (איור 7) נתן תוצאה של 0.3ppm לאחר 24 שעות.

תוצאות הניטור של צוות המכון במכשיר הקולורימטרי מוצג בטבלה 4.

טבלה 4 : תוצאות הניטור לאמוניה מעל משטח הבטון בבדיקה קולורימטרית (נפח המדגם 500 סמ"ק, לקבלת רגישות של 0.1 ppm)

מס' סידורי של נקודת מדידה	זמן דגימת אוויר מתחילת ניסוי (העמסת בטון במפעל), שעות	ריכוז אמוניה באוויר מעל המשטח ppm
1	1.40-1.50	<0.1
2		<0.1
3		<0.1
1	2.40-2.50	<0.1
2		<0.1
3		<0.1
1	3.40-3.50	<0.1
2		<0.1
3		<0.1
1	5.20-5.30	<0.1
2		<0.1
3		<0.1
1	7.20-7.30	<0.1
2		<0.1
3		<0.1
1	27.10-27.20	<0.1
2		<0.1
3		<0.1

נערכה בדיקה נוספת בתום שש שעות מתחילת יציקה הבטון, במרחק של 10 ס"מ מפני הבטון, ולא נמצא בה אמוניה, דהיינו ריכוז אמוניה מתחת ל- 0.1 ppm.

תוצאות הניטור בנקודות המדידה הקבועות בבדיקה לפי תקן NIOSH מוצגות בטבלה 5.

טבלה 5 : תוצאות הניטור לאמוניה מעל משטח הבטון בבדיקה לפי תקן NIOSH (משך מדידה של 90 דקות)

זמן, שעות	ריכוז אמוניה, ppm, בנקודה מס'		
	1- מערבית	2 - מרכזית	3- מזרחית
0 - 1.5	< 0.1	< 0.05	< 0.1
1.5 - 3.0	< 0.05	< 0.1	< 0.1
3.0 - 4.5	< 0.1	< 0.05	< 0.1
4.5 - 6.0	< 0.1	< 0.1	< 0.1
24.0 - 25.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1

תוצאות הניטור של צוות המכון הלאומי לחקר הבנייה במהלך היציקה מוצגות בטבלה 6.

טבלה 6 : תוצאות ניטור הצוות במהלך היציקה של המשטח באתר המכון הלאומי לחקר הבנייה

תפקיד	ריכוז אמוניה, ppm	משך בדיקה, דקות
צוות טכניון	< 0.1	67
צוות טכניון	0.2	67

## 7. ניטור במתקן הסימולציה המעבדתי

הניטור במתקן המעבדתי בוצע בשתי השיטות, הקולורימטרית ולפי תקן NIOSH. הניטור בוצע על פני 24 שעות כאשר במהלך יום העבודה הראשון הוא מבוצע בפרקי זמן של 1.5 שעות כדי לקבוע את השינוי בקצב פליטת האמוניה. הבדיקה במכשור לפי NIOSH בוצעה בארבע נקודות בהיקף המתקן והתוצאה המוצגת היא ממוצע של ארבע המדידות. ניתוח של כל הארבע לא מראה על הבדלים עקביים בין צדדי המדידה ומכאן המסקנה שהפיזור של האמוניה בעמודה מעל הבטון בגובה נתון הנו אחיד, וזו תוצאה של מבנה צינור ההזנה (איור 8). התוצאות מוצגות בטבלה 7 עבור הבדיקה הקולורימטרית ובטבלה 8 עבור המדידות לפי NIOSH.

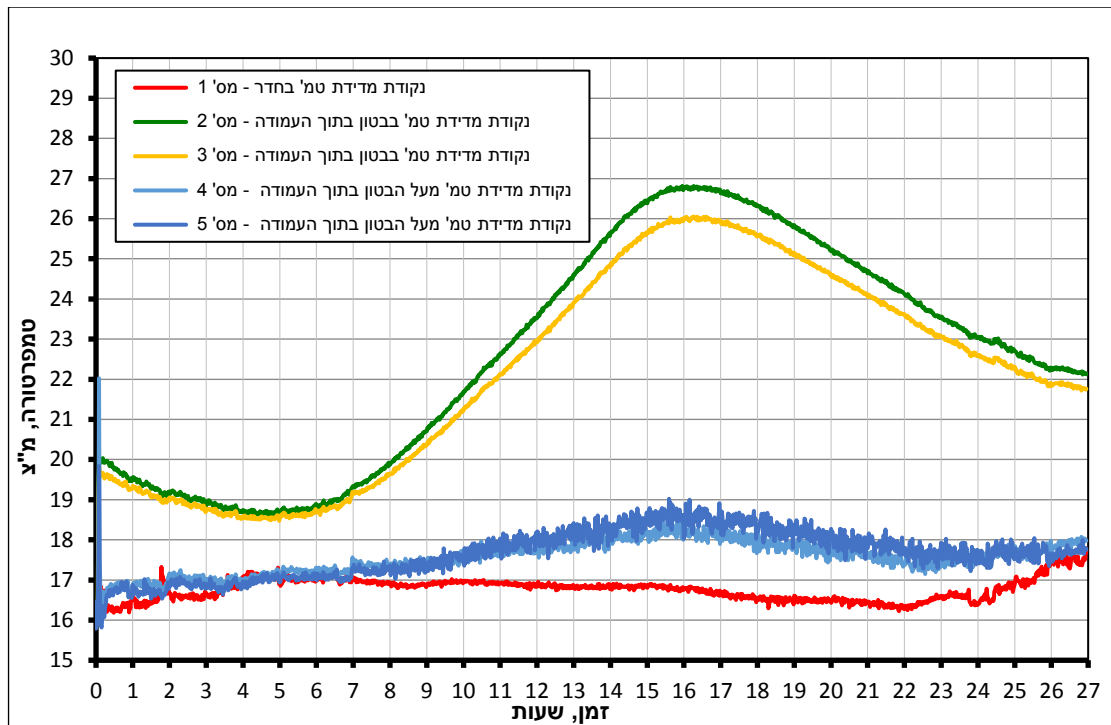
טבלה 7 : תוצאות הניטור במתקן המעבדתי במכשור קולורימטרי (נפח המדגם 500 סמ"ק, לקבלת רגישות של 0.1 ppm)

זמן, שעות	ריכוז אמוניה, ppm
2.4	0.3
3.3	0.4
5.0	0.5
6.3	0.6
8.0	0.9
24.0	0.3
25.5	0.25

טבלה 8 : תוצאות הניטור במתקן המעבדתי במכשור לפי תקן NIOSH

זמן, שעות	ריכוז אמוניה, ppm, בנקודת מדידה מס'				
	1	2	3	4	ממוצע
0 - 1.5	0.4	0.1	0.5	0.5	0.38
1.5 - 3.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.80
3.0 - 4.5	1.1	0.8	0.8	0.7	0.85
4.5 - 6.0	0.9	0.8	0.8	1.0	0.88
24.0 - 25.5	0.2	0.2	0.3	0.4	0.28

פרופיל הטמפרטורה על פני תקופת המדידה מוצג באיור 12. מערכת מיזוג האוויר במעבדה, שנועדה לשמור על טמפרטורה קבועה של 21 מ"צ לא הופעלה וזאת מתוך מגמה להשוות עד כמה שאפשר את הטמפרטורה במעבדה לזו שבמשטח הבטון בחוץ אשר שם היא הייתה נמוכה מ- 21 מ"צ.

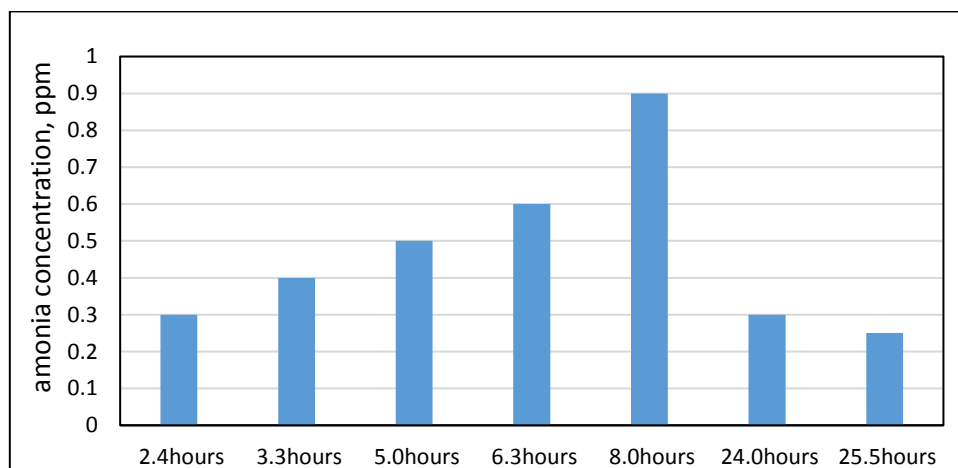


איור 12 : פרופיל הטמפרטורה של הבטון במתקן הסימולציה המעבדתי

### 8. דיון

הניטור בבדיקה הקולורимטרית הראה פליטה אפסית של אמוניה מעל משטח הבטון (מדידה ברגישות של כ- 0.1 ppm) בשעה שבבדיקה במתקן המעבדתי נצפו ערכים נמוכים, אך ניתנים למדידה, של ריכוז אמוניה, שהגיעו ל- 0.9 ppm לאחר 8 שעות וירדו ל- 0.3 ppm לאחר יום, איור

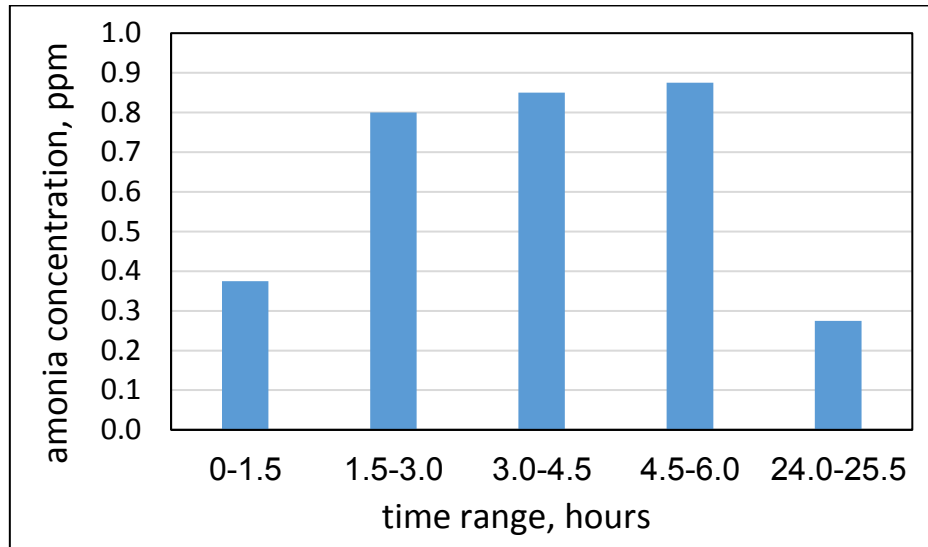
13.



איור 13 : ריכוזי אמוניה בעמודה מעל הבטון בבדיקה המעבדתי במדידה קולורимטרית

המגמות בבדיקה לפי תקן NIOSH באתר היציקה ובמתקן הסימולציה המעבדתי הראו גם הם מגמות דומות, פליטה אפסית במשטח הבטון (נקודות המדידה הקבועות, טבלה 5) וערכים נמוכים במתקן המעבדתי, שהגיעו למקסימום של כ- 0.9 ppm בסוף יום המדידה, בין 4.5 ל- 6 שעות

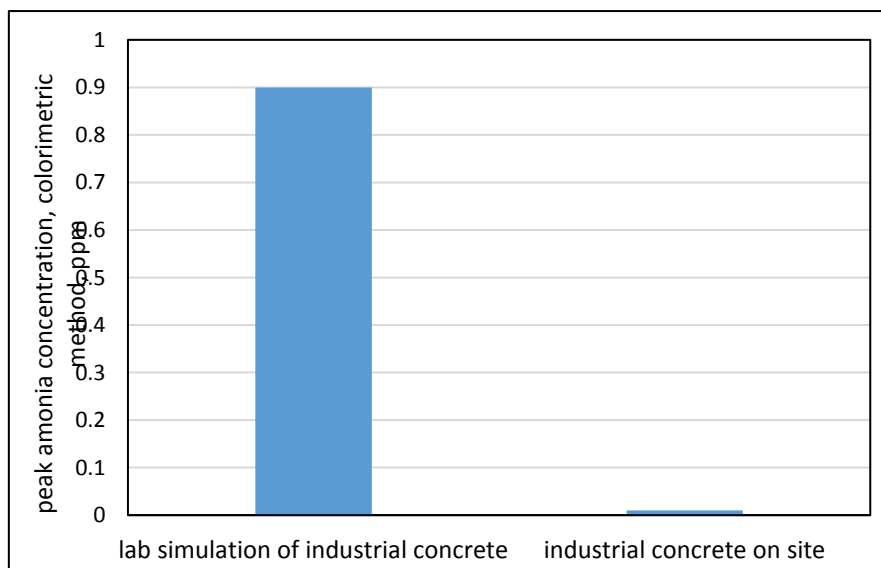
מתחילת המדידה בעמודה, כ- 6 עד 7.5 שעות מהעמסת הערב במפעל, איור 14. הערך הזה של 0.9ppm דומה לערך המתקבל בבדיקה הקולורמטרית, איור 13.



איור 14 : ריכוזי אמוניה בעמודה מעל הבטון בבדיקה המעבדתית במדידה לפי NIOSH (הזמנים הם מתחילת המדידה בעמודה של מתקן הסימולציה המעבדתית, והם מתחילים לאחר 1.5 שעות מהעמסת הערב במפעל).

הפליטה האפסית בנקודות המדידה באתר תואמות את התצפיות של מדידת האמוניה בצוות אשר הראתה חשיפה אפסית גם באתר היציקה בטכניון וגם באתר המפעל, טבלאות 3 ו-5.

בהקשר זה כדאי להשוות בין ריכוז האמוניה המרבי באוויר מעל משטח הבטון בחוץ והריכוז של האמוניה של אותו בטון בתוך המתקן המעבדתי, איור 15.

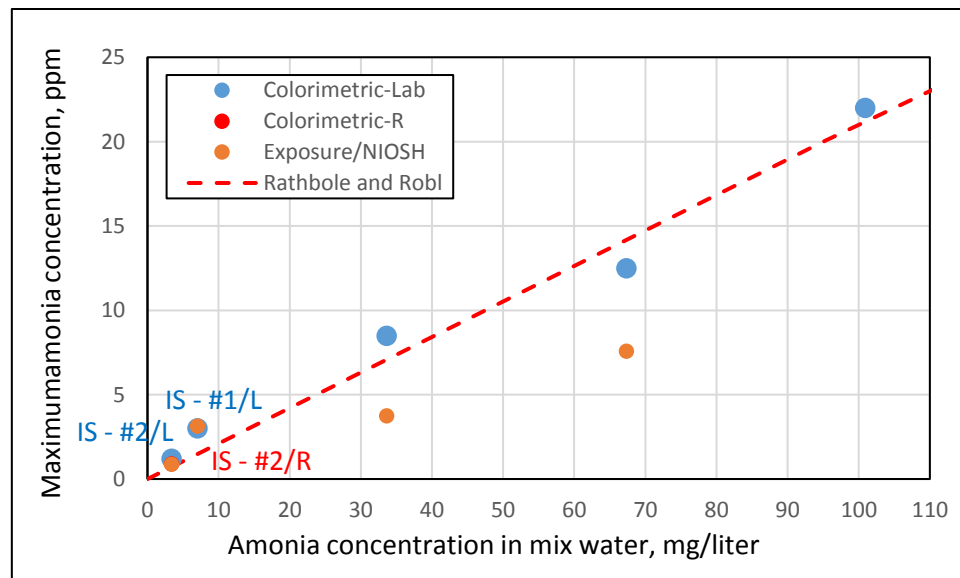


איור 15 : ריכוז מרבי של אמוניה באוויר מעל הבטון במשטח היצוק בשטח ומעל הבטון במתקן הסימולציה המעבדתי



מאחר והרכב הבטונים זהה ותנאי הטמפרטורה אינם שונים באופן ניכר, הרי ניתן ליחס את ההבדל המשמעותי בריכוז בין שני התנאים (איור 15) להבדל במהירות זרימת האוויר שהיא אמנם נמוכה בתנאי הסביבה בחוץ, אך עדיין כ-פי 50 גבוהה יותר ממהירות הזרימה במתקן המעבדתי המוגדרת כאוויר כמעט עומד.

באיור 16 מוצגות כל התוצאות שהתקבלו עד כה, בשלב הראשון של הבדיקה המעבדתית עם האפר הגרמני ובבדיקות של האפר הישראלי (IS-#1 – מדגם ראשון ממתקן SCR של חברת חשמל עם תכולת אמוניה של 11ppm, IS-#2 – מדגם שני אשר שמש בניסוי הנוכחי ובו תכולת האמוניה 4ppm). הנתונים באיור הם של הערך המרבי של תכולת אמוניה בבדיקה המעבדתית, באוויר מעל הבטון, בתלות בתכולת האמוניה המחושבת במי התערובות בבטון, ביחידות של מ"ג אמוניה לליטר מי תערובת. ניתן לראות שכל הבדיקות המעבדתיות, הן של האפר הישראלי (מדגם מס' 1 שנבדק בספטמבר 2016 ומדגם מספר 2 ששמש בניסוי זה) והן של האפר הגרמני, ניתנות לתיאור על ידי קשר ליניארי התואם את הקשר המדווח בספרות. הקשר הזה הוא עבור בדיקה בתנאים של מהירות רוח נמוכה מאד, שניתן להגדירה כאוויר כמעט עומד.



איור 16 : הקשר בין התכולה המרבית אל האמוניה באוויר בבדיקה המעבדתית ובין התכולה המחושבת במי תערובת הבטון

## 9. מסקנות

- בתנאים שנבדקו כאן (בטון ב-30, 160 ק"ג/מ"ק אפר עם תכולת אמוניה של 4 ppm, טמפרטורה של כ-15 מ"צ במהלך היציקה ומהירות רוח של כ-0.50 מטר לשנייה – 30 מטר לדקה), הפליטה של אמוניה לאוויר והחשיפה של העובדים שנוטרו, הראתה על ריכוז אפסי של אמוניה, הן במפעל הבטון והן באתר היציקה. גם כשמתקרבים מאד לפני הבטון, 10 ס"מ מעליו, ריכוז האמוניה היה נמוך מאד או אפסי.
- הבדיקה של הבטון שיוצר במפעל אשר נבדק במתקן הסימולציה המעבדתי הראתה פליטה נמוכה של אמוניה, עם שיא של 0.9 ppm. זה אמנם ערך נמוך, אך הרבה יותר גבוה מהפליטה בשטח שהייתה אפסית. תצפית זו מאששת את ההערכה שהבדיקה במתקן

הסימולציה המעבדתי מייצגת תנאים שהם הרבה יותר קשים מתנאי השטח, בעיקר בגלל מהירות זרימת האוויר הנמוכה במתקן, של אוויר כמעט עומד.

- הבדיקות במתקן הסימולציה המעבדתי של מדגמי האפר שיוצרו בארץ הראו שפליטת האמוניה מהם מתיישבת על הקשר הלינארי שפותח במחקר הזה ובאחרים, בין השיא בריכוז האמוניה ובין תכולת האמוניה המחושבת במי התערובת. תצפית זו מאששת את האפשרות להשתמש בקשר זה לחיזוי התנהגות של בטונים עם אפר פחם המכיל אמוניה בכל הקשור לפליטה שלו לאוויר.



Founded By  
Ministry of Construction

Technion-Israel Institute of Technology  
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של  
משרד הבינוי

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
National Building Research Institute



2020499

## Utilization of Amonia Containing Fly Ash in Concrete

**MSc. Pavel Larianovsky      Prof. Arnon. Bentur**

**With Participation of**

**Shmuel Grady      Nadav Zak**

**Occupational Health & Hygiene Ltd**

Copyright © 2017 by P. Larianovsky and A. Bentur  
The National Coal Ash Board and The Technion Research and Development  
Foundation, Ltd, Haifa

Haifa

March 2017

