

דוח לתכנית מחקר 12-4354-459

## הרחקה וטיפול באמוניה מלולים למניעת זיהום והפקת דשן

### Ammonia removal and treatment from poultry houses for contamination prevention and fertilizer production

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

ע"י

בני לב המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי  
מיכל גרין הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון  
שלמה יהב המכון לחקר בעלי חיים, מינהל המחקר החקלאי

Beni Lew, Agricultural Engineering Institute, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [benilew@agri.gov.il](mailto:benilew@agri.gov.il)

Michal Green, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion, Haifa. E-mail: [agmgreen@tx.technion.ac.il](mailto:agmgreen@tx.technion.ac.il)

Shlomo Yahav, Animal Science Institute, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [yahavs@agri.huji.ac.il](mailto:yahavs@agri.huji.ac.il)

#### תקציר

אמוניה גזית בלולים רעילה לעופות ולבני אדם. בנוסף, באוויר אטמוספרי היא גז התורם לאפקט החממה, להערכת האוויר, לזיהום מים, להחמצת קרקעות ולריחות רעים. המחקר הנוכחי מתמקד בפיתוח תהליך חדשני, יעיל וזול לטיפול בפליטת אמוניה מלולים. המערכת המוצעת משלבת את יתרונותיהן של מערכת כימית (יעילות גבוהה של ספיגת אמוניה עקב ערכי הגבה נמוכים) עם אלו של מערכות ביולוגיות מקובלות המבוססות על הוספה מינימאלית של כימיקלים והפיכת אמוניה לניטראט (ניטריפיקציה), המשמש כדשן חנקתי יציב.

תוצאות המחקר הראו שניתן להגיע לספיחה וטיפול באמוניה בקצב גבוה, כאשר אלקליניות נובעת מהאמוניה גזית ומהגיר (בי-קרבונאט). ריכוז הניטראט עלה עם הזמן בתוך המערכת, דבר המצביע לכך שאכן כול האמוניה עבר ניטריפיקציה ועליה בריכוז מלח בתמיסה השפיעה בצורה מועטה למערכת. עבור ריכוזי המקובלים בלולים (5-50 ppm) מתקיים ספיחה מלאה בתנאי עבודה שונים של מהירות אוויר (0.8-8.6 ס"מ לשנייה) וערכי הגבה ( $4.0 < \text{pH} < 7.0$ ). כמו כן, קצב מעבר אמוניה עולה באופן ישיר עם העלייה בספיקת הגז המזוהם, אך, אינו מושפע מערך ההגבה.

**הצהרת החוקר הראשי: הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.**

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

## 1.1 תוכן עניינים

02	1.2 מבוא
03	1.3 מטרות המחקר
04	1.4 פירוט עיקרי הניסוי
11	1.5 דיון
12	1.6 ביבליוגרפיה

## 1.2 מבוא

חקלאות, ובעיקר משק החי הם הגורמים העיקריים לפליטת אמוניה גזית ( $\text{NH}_3$ ). כ-40% מכלל האמוניה הגזית העולמית הנפלטת לאטמוספירה מקורה במשק החי, מתוך זה כ-10% עד 15% מכלל פליטות האמוניה מקורם בלשלת עופות [1]. בישראל הלולים למיניהם (גידול תרנגולות מטילות, תרנגולות לפיטום ולרבייה, תרנגולי הודו וכדומה) מייצרים יותר ממיליון טונות זבל יבש בשנה ובתוכו כמות האמוניה כחנקן היא 10,000 טונות [2].

אמוניה גזית בלולים רעילה לעופות ולבני אדם. בנוסף, באטמוספירה היא גז התורם לאפקט החממה, להערכת האוויר, לזיהום מים, להחמצת קרקעות ולריחות רעים. על מנת לשמור על בריאות העופות והמגדלים ולקיים תנאי גידול מתאימים, כל סוגי הלולים כוללים מערכות אוורור מתקדמות לשמירה על ריכוז נמוך של אמוניה בפאזה הגזית ועל טמפרטורה נאותה (בין 24 לבין 29 מעלות צלזיוס). לפיכך, האמוניה הנפלטת מגידול העופות מורחקת בעילות רבה מהלול, אך מתפזרת בסביבה. הספיקה הגבוהה מאוד של מערכת האוורור בלול, בעיקר בתנאים של טמפרטורות גבוהות, גורמת לכך שריכוז  $\text{NH}_3(\text{g})$  הנפלט מהלול יכול להגיע לערכים נמוכים ביותר (פחות מ-10 ppm) אולם השטף הכולל של האמוניה נשאר גבוה עקב ספיקות האוורור הגבוהות [3-6].

### פתרונות קיימים לטיפול באמוניה גזית בלולים

המערכות הנפוצות ביותר כיום לטיפול בגזי האמוניה הינן מערכת כימית (acid scrubbers) ומערכת ביולוגית. שתי השיטות מבוססות על ספיחת האמוניה מהפאזה הגזית למימית על ידי מעבר האוויר המזוהם דרך עמודת מים כך שמתקיים מגע הדוק בין הגז למים [4, 5].

**מערכת כימית** - מערכת כימית הינו ריאקטור המכיל תמיסה בעלת ערך הגבה נמוך. האוויר המזוהם מוכנס לריאקטור בחלק התחתון והערך הגבה הנמוך ומגע בין הגז לבין הנוזל מאפשר מעבר חומר מהפאזה הגזית לנוזלית בקצב גבוה. חלק מהנוזל מופרש מהמערכת ומוחלף בחומצה שיכולה לספוח אמוניה נוספת.

אחרי ספיחת אמוניה לפאזה הנוזלית, אמוניה ( $\text{NH}_3$ ) נמצא בשיווי משקל עם אמוניום ( $\text{NH}_4^+$ ) כפונקציה בערך הגבה, בריכוז האמוניה הכולל (TAN) וערך קבוע דיסוציאציה ( $K_N$  השווה ל- $10^{-9.25}$ ). ריכוז יון האמוניה ( $\text{NH}_3$ ) יורד עם הירידה בערך הגבה. כדי לשמור על קצב גבוה של ספיחת אמוניה לפאזה הנוזלית חייבים לשמור על ריכוז נמוך של אמוניה בתמיסה, דבר שאפשרי בערכי

הגבה נמוכים, אך ספיחת אמוניה גורמת לעלייה בערך הגבה. כתוצאה מכך, מערכת כימית לספיחת אמוניה דורשת השקעה תמידית של כימיקלים כדי לשמור על ערך הגבה המתאים. בנוסף, עלות הקמת המתקן ואחזקתו גבוהים יחסית כיוון שעשויות להיווצר בעיות של קורוזיה בעקבות שימוש בחומרים מחמצנים חזקים או תגובה של המזהם הנספח עם המים שתיצור חומרים קורוזיביים [4].

*מערכת ביולוגית* - במערכות כימיות הפועלות בערכי הגבה נמוכים, ריכוז האמוניה בפאזה הנוזלית עולה עם הזמן, בעוד שבמערכות ביולוגיות מחומצנת האמוניה בפאזה הנוזלית על ידי חיידקים ניטריפיקנטים לניטראט (חומר יציב יותר לשימוש כדשן חנקתי) בערך הגבה ניטראלי. הריאקטור מלא בחומר מילוי בעל נקבוביות גבוהה. האוויר המזוהם מוכנס לריאקטור בחלק התחתון והנקבוביות הגבוהה מאפשרת שטח מגע גדול בין הגז לבין הנוזל - מעבר חומר מהפאזה הגזית לנוזלית בקצב גבוה. חלק מהנוזל ממוחזר ואילו חלק אחר מופרש מהמערכת עקב הצטברות מלחים שעלולים לעכב את פעילות החיידקים ומוחלף בנוזל נקי.

חיידקים ניטריפיקנטים דורשים תנאים מתאימים לגידול: לחות, טמפרטורה, חמצן וערך הגבה בסביבות 7.0. שמירת ערך הגבה זה נעשית ע"י הוספת בסיס (אלקליניות) לנטרול יוני המימן שמשחררים בתהליך ניטריפיקציה. חומרים המשמשים כתוספת אלקליניות לריאקטור ניטריפיקנטי (NaOH או ביקרבונט) יקרים מאשר אלו שמשמשים למערכות כימיות.

לאחרונה הוכח שניטריפיקציה בכלל ובדגש על טיפול בשפכים אינה מוגבלת לתנאים של ערך הגבה ניטראלי כמו שהיה מקובל עד כה. נמצא שניתן לבצע ניטריפיקציה מהירות קצב גם בערכי הגבה נמוכים, עד pH 3.5. בערך הגבה כה נמוך ניתן להשתמש בגיר (chalk) כתוספת לאלקליניות, עקב מסיסותו הגבוהה רק בערכי הגבה נמוכים ובנוסף, מחירו הנמוך יחסית.

הצעת מחקר זו מתמקדת בפיתוח של ביופילטר חדשני ויעיל יותר לטיפול בפליטת אמוניה מלולים למניעת ריחות רעים, זיהום אוויר, קרקע ומים וליצור דשן חנקתי. לאור הצורך בצמצום ההוצאות לחקלאות בישראל ובעולם, מים המסולקים מהריאקטור לטיפול באמוניה בלולים עשויים להוות פתרון יעיל למגדלי עופות (מכירת המים כדשן), לחקלאות (דשן חנקתי), למדינה ולסביבה (הפקת דשן חנקתי אחראי על כ-2% מסה"כ צריכת האנרגיה העולמית).

בשונה ממערכות ביולוגיות המקובלות, תהליך ניטריפיקציה יתבצע בקצב גבוה לעומת הערך ההגבה הנמוך, כאשר גיר (חומר בעלות נמוכה) משמש כנשא לביופילם, כחומר המילוי בעמודת ריאקטור וכתוספת לאלקליניות. השימוש בגיר מונע את הצורך בהוספת כימיקלים יקרים. בהתבסס על תוצאות העבר, שומר הגיר על ערך הגבה קבוע בין 4 ל-5 (כתלות בגודל גרגרי הגיר ודרגת ניקיונו) והמסת הגיר (ובהתאם הוספת גרגרי גיר) היא סטוכיומטרית לאמוניה שהתחמצנה.

שימוש במערכת המוצעת עשוי להקטין עלויות הכרוכות הן בבניה (מערכות במחצית הגודל של מערכות הקיימות היום) והן בתפעול לטיפול באמוניה בלולים (הוצאות מינימאליות של כימיקלים).

### 1.3 מטרות המחקר

פיתוח מערכת ביולוגית חדשנית ויעילה לטיפול בפליטת אמוניה מלולים למניעת ריחות רעים, זיהום אוויר, קרקע ומים וליצירת דשן חנקתי עם הצאות נמוכות יחסית.

מטרות פרטניות :

- קביעת מדדים תפעוליים למערכת כימית בערכי הגבה שונים בפאזה הנוזלית וריכוז אמוניה בפאזה הגזית ובספיקות אוויר שונות ;
- קביעת תנאים כימיים ופיסיקליים להתמוססות גיר בתנאים שונים המתקיימים במערכות ביולוגיות- ערך הגבה וריכוז מלחים ;
- קביעת מדדים תפעוליים לריאקטור ביולוגי במשטח זרימה רווי – ערך הגבה, ריכוז אמוניה מירבי בפאזה הגזית, ספיקת אוויר מירבית, אחוז החלפת תמיסת הריאקטור ;

#### 1.4 פירוט עיקרי הניסוי

##### קביעת מדדים תפעוליים למערכת כימית

בשלב ראשון הופעל הריאקטור ללא חיידקים, כמערכת כימית להמסת אמוניה. המטרה הייתה לקבוע מדדים תפעוליים: קבוע מעבר אמוניה מהפאזה הגזית לנוזלית ( $k_{La}$ ) בתנאים שונים של ספיקת אוויר וערך הגבה בתמיסה.

חישוב של קבוע מעבר אמוניה נעשית בעזרת משוואה 1 בהנחה שריכוז האמוניה בפאזה הנוזלית קבוע בכול גובה עמודת מים (ערבוב מלא בעמודה), מעבר אמוניה מהפאזה הגזית לנוזלית מתרחש רק בזמן שבועת אוויר נעה בעמודת מים (אין מעבר בשטח פנים הפתוח של עמודת מים) ושזמן השהיה של בועת אוויר במים הוא גובה עמודת מים מחולק במהירות אוויר. מהירות אוויר מחושבת ע"י ספיקת האוויר מחולקת בשטח הפנים של תחתית הריאקטור.

$$k_{La} = \frac{v}{h} \ln \left( \frac{P_{in}/H - C}{P_{out}/H - C} \right) \quad (1)$$

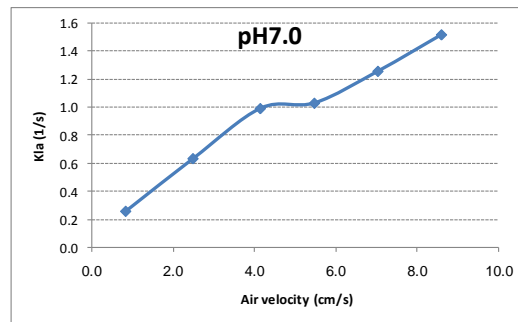
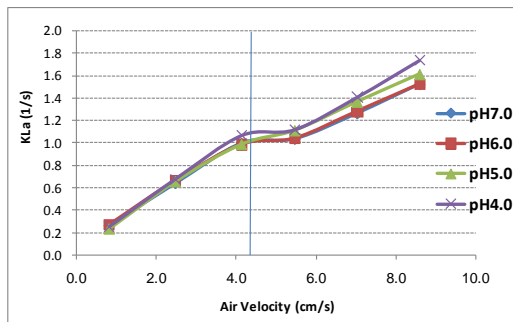
כאשר  $v$  הוא מהירות אוויר,  $h$  הוא גובה עמודת מים,  $P$  הוא ריכוז אמוניה באוויר,  $H$  קבוע הנרי ו- $C$  ריכוז אמוניה ( $NH_3$ ) בפאזה הנוזלית. בנוסף, כדי לחשב את ריכוז האמוניה מכלל ריכוז אמוניה/אמוניום בפאזה הנוזלית, יש להתחשב בערך הגבה, מוליכות חשמלית, טמפרטורה וקבוע הדיסוציאציה ( $k_N$ ).

כדי לחשב קבוע מעבר אמוניה הורצה את המערכת בספיקות אוויר שונות בערכי הגבה שונים. בכול הרצה נמדד ריכוז אמוניה באוויר בכניסה וביציאה של המערכת (חשוב לקבל מדידה של אמוניה בפאזה הגזית ביציאת המערכת לחישוב קבוע מעבר גזים), ריכוז כלל אמוניה/אמוניום בפאזה הנוזלית, ערך הגבה, מוליכות וטמפרטורה. נתונים של כול ההרצות בערכי הגבה שונים וספיקת אוויר שונות לא נתונים בדוח זה.

בהתבסס על [7] Kantarci et al. הורצה המערכת בשני סוגי תווך לזרימת אוויר: למינרי (בין 166.7 לבין 833.3 סמ"ק לשנייה, או עד 5 ס"מ לשנייה) ובין למינרי לטורבולנט (בין 1101.2 לבין 1730.5 סמ"ק לשנייה, או מעל 5 ס"מ לשנייה). לא ניתן להריץ את המערכת במהירות אוויר גבוהה יותר עקב מגבלות טכניות.

תוצאות חישוב של קבוע מעבר אמוניה בערך הגבה 7.0 במהירויות אוויר שונות ניתנות באיור 1.א'. ניתן לראות עליה בקבוע מ-0.26 ל-1.52 (1/s) עם עלייה במהירות אוויר מ-0.8 ל-8.6 ס"מ לשנייה. העלייה בקבוע מעבר הגז עם העלייה במהירות האוויר נובעת מערבול טוב יותר של הגז בנוזל המאפשר מגע טוב יותר בין גז לנוזל. העלייה בקבוע מעבר גז הינה ליניארית באותו סוג תווך זרימת אוויר - למינרי (עד 5 ס"מ לשנייה) ובין למינרי לטורבולנטי (מעל 5 ס"מ לשנייה); ואילו במעבר מזרימה למינרית לזרימה בין למינרית לטורבולנטית משתנה העלייה בקבוע מעבר הגז.

תוצאות חישוב של קבוע מעבר אמוניה בערכי הגבה שונים ובמהירות אוויר שונות ניתנות באיור 1.ב'. גם כאן נמצאה תבנית דומה של עלייה בקבוע המעבר עם העלייה במהירות האוויר. התוצאות מורות על עלייה זהה בערכי קבוע המעבר כתלות במהירות זרימת האוויר וללא תלות בערך ההגבה אך זאת רק במהירויות זרימת האוויר הנמוכות יותר. במהירויות זרימה גבוהות נמצאו הבדלים קלים, עם עלייה בקבוע מעבר הגז עם הירידה בערך ההגבה. בערכי הגבה נמוכים ריכוז האמוניה בפאזה הנוזלית נמוך יותר מאשר בערכי הגבה גבוהים ובמהירות אוויר גבוהות גרדיאנט ריכוז אמוניה (הפרש בין פאזה הגזית לנוזלית) משמעותי יותר.



איור 1: קבוע מעבר אמוניה מהפאזה הגזית לנוזלית ( $k_{La}$ ) במהירויות אוויר שונות בערך הגבה 7.0 (א') ובערכי הגבה שונים (ב')

על סמך תוצאות קבוע מעבר אמוניה שקיבלנו נבנה מודל המחשב את גובה עמודת המים הנדרש לקליטת האמוניה מהאוויר (מריכוז עד ריכוז הרצויים) במהירויות אוויר שונות וערכי הגבה שונים. המודל לוקח בחשבון את טמפרטורת האוויר, ריכוז אמוניה בפאזה הנוזלית ומוליכות חשמלית. בטבלה 1 ניתן לראות תוצאות הרצאת המודל בטמפרטורת 25 מעלות צלזיוס, מוליכות של 3 mS/cm, ריכוז אמוניה באוויר של 20 ppm (ריכוז המצוי ביציאת מאווררים של לולים), ריכוז אמוניה אחרי ספיגה של 0.5 ppm וריכוז אמוניה בפאזה הנוזלית של 1 מ"ג לליטר (ריכוז המצוי בריאקטורים ביולוגיים).

תוצאות המודל מראות שריאקטור שספיגת אמוניה נמוך יותר מאשר אלו של Mor [3], 1 מטר. אך, עלייה במהירות אוויר גורמת להגדלת גובה הריאקטור להרחקה מלאה של האמוניה. בנוסף, ניתן לראות ירידה בזמן שהיה הדרוש לקליטת האמוניה (גובה הריאקטור מחולק במהירות האוויר) מ-14.2 ל-1.31 שניות עם העלייה במהירות אוויר מ-0.83 ל-15.76 ס"מ לשנייה כתלות בערך הגבה.

תוצאות דומות של זמן שהיה הנחוץ לקליטת האמוניה מהאוויר המזוהם לתמיסה המימית התקבלו ע"י Melse and Ogink [4] במהירויות אוויר גבוהות.

טבלה 1 : גובה מים בס"מ להורדת ריכוז אמוניה בפאזה הגזית מ-20 ל-0.5 ppm ב-25 מעלות

צלזיוס במהירויות אוויר שונות וערכי הגבה שונים

ערך הגבה				מהירות אוויר (ס"מ לשנייה)
7.0	6.0	5.0	4.0	
12.3	11.8	11.7	11.7	0.83
15.1	14.4	14.4	14.4	2.49
15.8	15.1	15.1	15.1	4.15
19.9	19.1	19.0	19.0	5.81
20.6	19.7	19.6	19.6	7.46
21.0	20.1	20.0	20.0	9.12
21.3	20.4	20.3	20.3	10.78
21.5	20.6	20.5	20.5	12.44
21.7	20.8	20.7	20.7	14.10
21.8	20.9	20.8	20.8	15.76

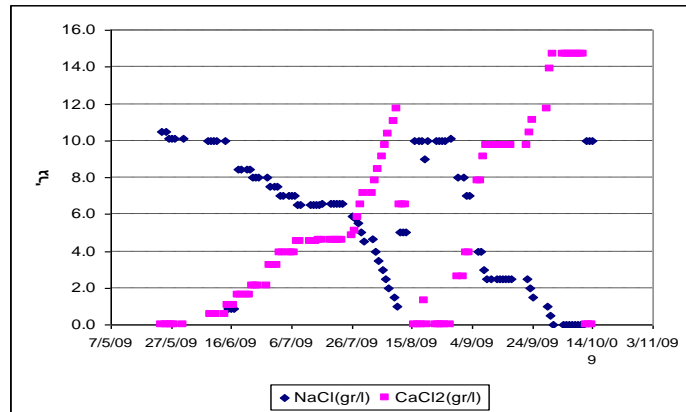
לבדיקת תוצאות המודל הרצנו את הריאקטור בתנאים דומים לאלו של המודל, אך, בגובה עמודת מים של 30 ס"מ ובריכוזים משתנים של אמוניה בפאזה הגזית (בין 5 ל-50 ppm- ריכוזים מקובלים ביציאת המאווררים של לולים). ריכוז אמוניה בפאזה הגזית ביציאת הריאקטור היה אפס בכול התנאים שעבדנו דבר המצביע לכך שהמודל אכן מתאר את המציאות וניתן להשתמש בו לתכנון מערכת ספיגת אמוניה מהאוויר בתנאים של לולים.

#### קביעת תנאים כימיים ופיסיקליים להתמוססות גיר

במערכות רציפות לחמצון ביולוגי של אמוניה במים (או שפכים) ריכוז המלחים (בעיקר קלציום) נשאר קבוע עם הזמן. במערכת המוצעת אין יציאת מים ועל כן ריכוז המלחים עולה עם הזמן. עליית ריכוז סידן בפאזה הנוזלית עשויה לגרום לכך שמסיסות הגיר תרד ופגיעה בפעילות החיידקים.

מטרת מערכת ניסויית זו היא לקבוע את השפעת ערך ההגבה על פעילות החיידקים ויכולת המסת הגיר בתנאים של א) מליחות גבוהה המשפיעה על קבוע המסיסות של הגיר וב) ריכוז סידן גבוה ומשתנה. לשם כך נבנתה מערכת רציפה שבוחנת את חמצונה של האמוניה בפאזה הנוזלית בתנאים שעשויים להתפתח בריאקטור הניסויי ולא את יכולת התמוססות האמוניה הגזית בנוזל, כאשר תוספת האלקליניות מקורה בהתמוססות הגיר בלבד.

הניסוי ערך כ 4.5 חודשים במהלכם שונו התנאים למעט המוליכות בריאקטור שנשמרה קבועה בערך של כ- 1%. בתחילת הניסוי מקור המלחים העיקרי היה סודיום כלוריד והוסף גם ביקרבונאט כמקור לאלקליניות. בשלב זה נבדקה פעילות המערכת והחיידקים למטרות השוואה. בהמשך הניסוי הופסקה תוספת האלקליניות בהזנה. בשלב הבא של הניסוי הועלה בהדרגה ריכוז הסידן בהזנה ע"י תוספת קלציום כלוריד ובמקביל צומצם בהדרגה ריכוז סודיום הכלוריד. ניתן לראות את השינויים בריכוזי המלחים השונים כפונקציה של הזמן באיור 2.



איור 2: ריכוז NaCl וCaCl<sub>2</sub> בהזנה - הרצות לבדיקת השפעת ריכוז סידן גבוה ובהשוואה לריכוז גבוה של סודיום כלוריד

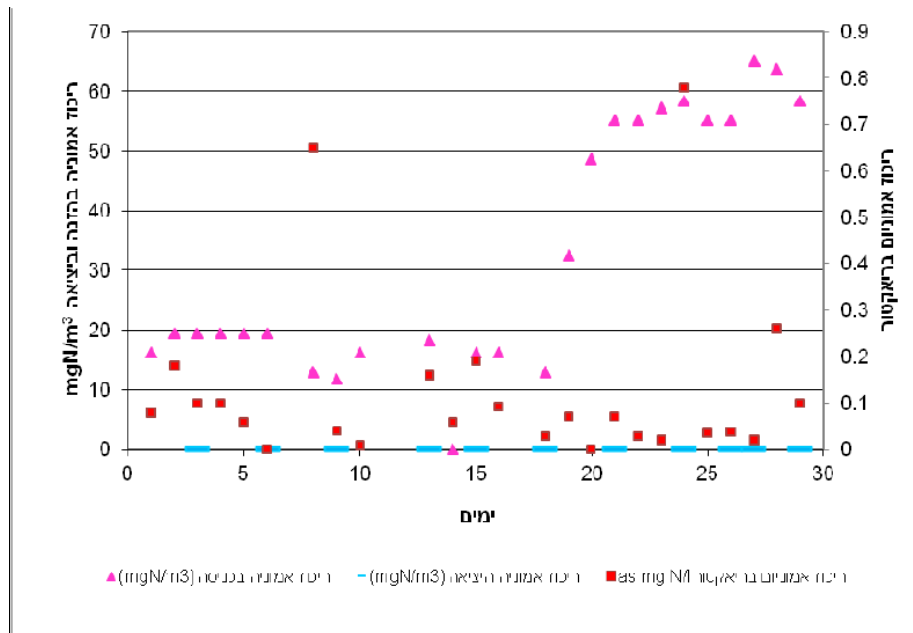
ניתן לראות שלאורך הניסוי ריכוז סודיום הכלוריד הורד ואילו ריכוז קלציום הכלוריד הועלה. בתאריכים 15/8-2/9 חלה תקלה בריאקטור והניסוי הותחל מחדש אולם התוצאות שנאספו לפני כן הוכנסו גם הן לאוסף הנתונים לשם ניתוח התהליך.

קביעת מדדים תפעוליים למערכת ביולוגית עם ספיקת אוויר נמוכה

הרצנו ריאקטור עם נשאי פלסטיק, משטר זרימה רוויה וללא הוצאת נוזלים. תוספת סודיום בי-קרבונאט (אלקליניות) נעשית על ידי בקר ערך הגבה לשמירת ערך הגבה נטרמלי (6.7-6.9) והזנה רציפה של אמוניה גזית, כאשר הריכוז נשמר קבוע והספיקות השתנו.

הבי-קרבונאט השתמש כדי לקבל חמצון מלא של האמוניה ועל מנת למנוע יעילות נמוכה של ספיגת האמוניה. הניסוי חולק למספר נתיבים מקבילים. בכול הריאקטורים שררו תנאים של כ-1% מלחים לפחות על מנת לדמות מצב המאפשר רענון של נפח מינימאלי של נוזלים בריאקטור.

בשלב הראשון ספיקת הגז האמוניה הייתה 18 ליטר לדקה, כאשר ריכוז אמוניה בפאזה הגזית נשמרה קבועה ב-15 חלקי למיליון (חל"מ) במשך 18 יום (עומס אמוניה של 16 מ"ג חנקן למ"ק). מיום 18, הריכוז העולה ל-50 חל"מ (עומס של 65 מ"ג חנקן למ"ק), עד סוף הניסוי (35 יום), איור 3. לכול ימי הניסוי ערך הגבה נשמר קבוע ב-6.7 על ידי הבקר.



איור 3: ריכוז אמוניה בפאזה גזית בכניסת המערכת (משולש ורוד), בפאזה גזית ביציאת המערכת (מלבן כחול) ובפאזה הנוזלית (ריבוע אדום), כאשר ספיקת אוויר הינה 18 ליטר לדקה.

ריכוז אמוניה בגז ביציאה מהריאקטור היה בכול משך הניסוי קרוב לאפס (0) כפי שניתן לראות באיור 3, דבר המאשר התוצאות שהתקבלו בשנה הראשונה של המחקר ומראה כל כך שהריאקטור מסוגל לספוג ולטפל באמוניה גזית בקצב גבוה. בנוסף, ריכוז האמוניה בפאזה הנוזלית גם הוא נשמר קבוע לעורך הניסוי ללא תלות בריכוז האמוניה באוויר הנכנס, 10 מג"ל. על בסיס התוצאות ניתן לראות שהמערכת מסוגלת לספוג ולטפל באמוניה גזית עד עומסים של 65 מ"ג חנקן למ"ק ריאקטור, כאשר מקור האלקליניות הינו בי-קרבוונט.

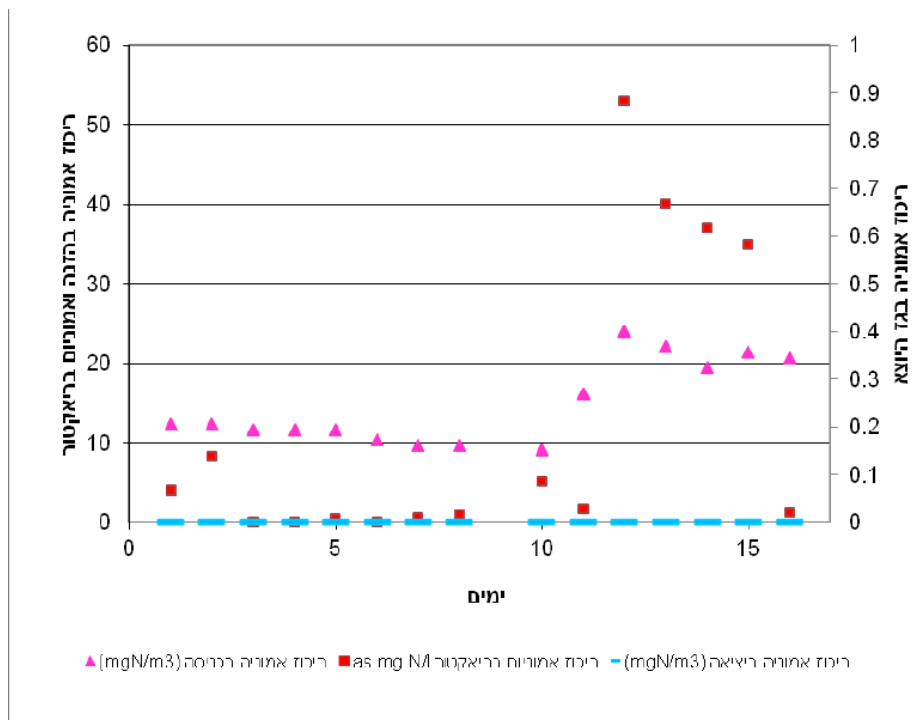
בנוסף לכך, נמדד את הריכוז ניטריט וניטראט בריאקטור עם הזמן. ניטריט וניטראט הינם תוצרים של ניטריפיקציה (ניטריט תוצר ביני וניטראט תוצר סופי). ריכוז הניטריט היה קרוב לאפס בכול 35 ימים של הניסוי וריכוז הניטראט עלה באופן ליניארי מ-1000 ל-1500 מג"ל כחנקן כפי שניתן לצפות בריאקטור ניטריפיקנטי ללא הוצאת נוזלים – הצטברות מלחים. תוצאות עלו מצביעות על כך שחידקים ניטריפיקנטים פעלו בקצב גבוה ללא מגבלויות (אין הצטברות של ניטריט).

תפוקה המרבית של הריאקטור היה 0.29 גרם אמוניה לליטר ריאקטור ליום, ערך נמוכה בהשוואה למערכות ניטריפינט אחרות לטיפול באמוניה נוזלית, 1.5 גרם אמוניה לליטר ריאקטור ליום [7]. אם זאת, המערכת הניסוית לא פעלה בקצב המרבי האפשרי וניתן להניח שבריכוזי אמוניה גזית גבוהים יותר, המערכת הייתה מטפלת בכ-100% מהאמוניה. עלייה נוספת של ריכוז אמוניה גזית לא בוצעה כיוון לעליה נוספת בריכוז האמוניה גזית לא מתאימה לריכוזים אופייניים באוויר בלולים. העלאת הספיקה לא התאפשרה עקב מגבלות טכניות של ציוד.

קביעת מדדים תפעוליים למערכת ביולוגית עם ספיקת אוויר גבוהה



בשלב השני ספיקת הגז האמוניה הייתה 41 ליטר לדקה למשך 20 יום. ריכוז אמוניה בפאזה הגזית בכניסת המערכת נע בין 13 ל-10 פל"מ באשה ימים הראשונים של הניסוי. מיום 10 עד יום 18 הריכוז הועלה ל-20 פל"מ (איור 4).

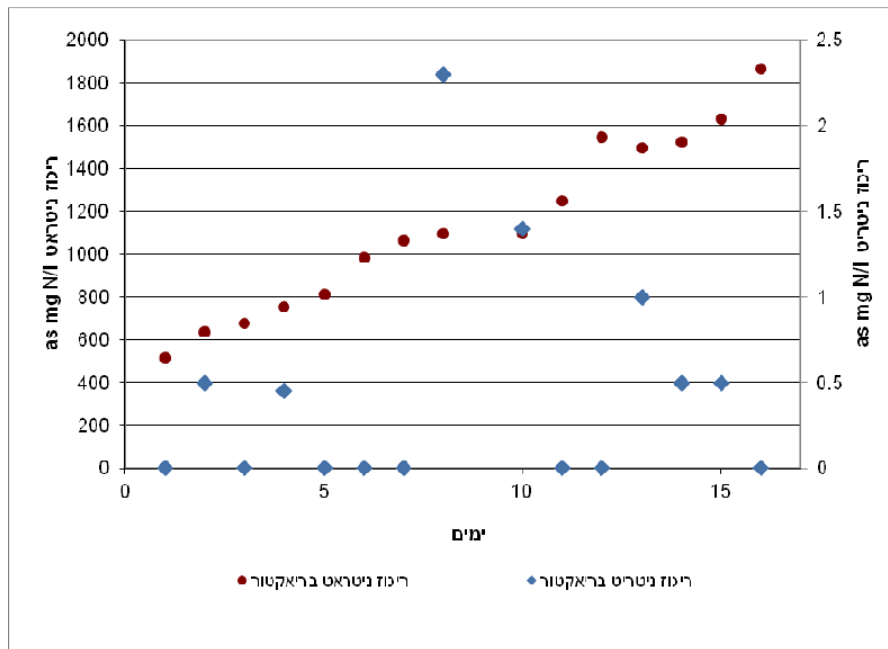


איור 4: ריכוז אמוניה בפאזה גזית בכניסת המערכת (משולש ורוד), בפאזה גזית ביציאת המערכת (מלבן כחול) ובפאזה הנוזלית (ריבוע אדום), כאשר ספיקת אוויר הינה 41 ליטר לדקה.

בכול תקופת הניסוי ריכוז אמוניה בפאזה הגזית ביציאת המערכת היה אפס, דבר המצביע לכך שכול האמוניה בפאזה גזית נספגו לפאזה הנוזלית. ריכוז האמוניה בפאזה הנוזלית היה נמוך באשרה הימים הראשונים של הניסוי, אך, כאשר ריכוז האמוניה בפאזה הגזית בכניסת המערכת הועלה ל-20 פל"מ, ריכוז אמוניה הפאזה הנוזלית קפצה ל-50 מג"ל וירד עם הזמן עד ריכוז קרוב לאפס ביום ה-18. עלייה הפתאומית של אמוניה בפאזה הנוזלית נובעת מהכנסת אמוניה למערכת בקצב גבוה מאשר החיידקים מסוגלים לפרק. אך, אם הזמן, החיידקים התרבו והגיעו לריכוז כה שניתן לטפל בכול האמוניה הקיימת במערכת.

מהירות אוויר בריאקטור (ספיקת אוויר מחולק בשטח פנים ריצפת הריאקטור) עמד על כ-8.7 ס"מ לשנייה. מהירות זאת גבוהה מאשר ריאקטורים דומים בספרות המטפלים ביעילות דומה באמוניה [3]. יתכן וחלקיקי הפלסטיק בריאקטור הניסוי אפשרו פיזור אחיד של בועות אוויר במערכת.

ריכוז הניטראט הפאזה הנוזלית עלה מ-500 עד ל-1900 מג"ל ב-20 יום הניסוי, כאשר קצב ניטריפיקציה לא ירדה כול התקופה, דבר המצביע לכך שריכוזים גבוהים של מלחים משפיעים במידה פחותה על קצב ניטריפיקציה (איור 5).



איור 5 : ריכוז ניטראט (עיגול אדום) וניטריט (מעוין כחול) בפאזה הנוזלית עם הזמן, כאשר ספיקת אוויר הינה 41 ליטר לדקה.

ריכוז הניטריט היה קרוב לאפס באשה ימים הראשונים של הניסוי ועלה ל-2 מג"ל אחרי העליה בריכוז האמוניה בכניסת הריאקטור. אם הזמן, ריכוז הניטריט ירד בחזה לאפס. עליה וירידה בריכוז הניטריט מחזק ההנחה שריכוז החיידקים במערכת לא היה מספיק גבוה כדי לטפל בכול האמוניה/ניטריט הקיימים, אך, חיידקים ניטריפיקנטים מתרבים בקצב גבוה ותוך שלושה ימים כבר קיים ריכוז מספיק גבוה כדי לטפל בכול אמוניה/ניטריט.

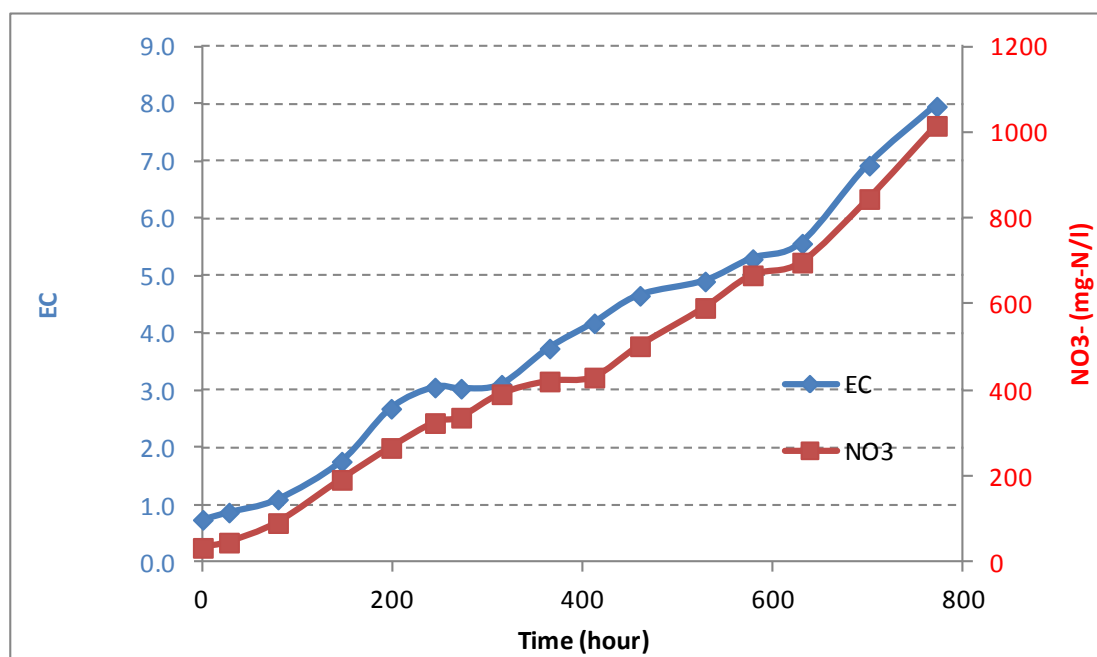
#### הפעלת מערכת בלול

מערכת המוצעת מורכבת בשתי עמודות הנמצאת כמטר וחצי מטר מעל הקרקע. העמודה העליונה מכילה חומר מילוי פלסטיק בעל נקבוביות גבוהה. על גבי החומר המילוי מרססים (משטח זרימה לא רווי) נוזל המחלל דרך החומר המילוי. נוזל המגיע לחלק התחתון של העמודה עובר לעמודה התחתונה בגרביטציה. עמודה התחתונה מכילה גיר כחומר מילוי ובנוסף, חיידקים ניטריפיקנטים. הנוזל מהעמוד העליון מחלל דרך הגיר והחיידקים. החיידקים מחמצנים את האמוניה לניטרט ומורידים את הערך הגבר; ירידה בערך הגבה גורמת להתמוססות הגיר (התורם אלקליניות). נוזל המגיע לחלק התחתון של העמודה התחתונה נשאב לריסוס נוסף על העמודה העליונה.

כאשר אוויר מהלולים העשיר בגורמי ריח (אמוניה, תרכובות גופרית ואבק) עובר דרך העמודה העליונה (זרימה כפלי מלה), הנוזל לוכד ביעילות גבוהה את גורמי הריח. ריכוז מלח קלציום ניטראט עולה עם הזמן בנוזל ובסוף התהליך ניתן להשתמש בו כדשן יציב בחקלאות.

המערכת הופעלה בלול אמיתי במכון וולקני למשך כשלושים יום (800 שעות). ספיקת אוויר הייתה 15 ליטר לדקה (מהירות של 1000 מטר לשעה); ספיקת מים 90 מ"ל לדקה (מהירות של 5.0 מטר לשעה). נמדדו ריכוזי אמוניה גזית בכניסה ויציאה של המערכת ובנוסף, ריכוזי אמוניה, ניטראט ומוליכות חשמלית בנוזל.

ריכוז אמוניה באוויר בלול במשך שלושים ימים היה קבוע בסביבות 5 חלפ"מ (ppm) לאומת ריכוז היוצא מהמערכת שהיה אפס כול זמן הניסוי. ריכוז אמוניה בנוזל היה קטן מאחד מ"ג לליטר, דבר המצביע לכך שכול האמוניה שנספגה לפאזה הנוזלית, התחמצנה על ידי חיידקים ניטריפיקנטים לניטראט. ריכוז ניטראט ומוליכות חשמלית בנוזל עלה עם הזמן, כפי שניתן לראות באיור 6.



איור 6: ריכוז ניטראט (מרובע אדום) ומוליכות חשמלית (מעוין כחול) בפאזה הנוזלית עם הזמן בהפעלת המערכת בלול.

עלייה בריכוז ניטראט ומוליכות בנוזל עם הזמן מצביע לכך שתהליך ניטריפיקציה פעילה ואמוניה מתחמצנת לניטראט. בנוסף, יחסי ניטראט לסין בנוזל היה כ-1:2 (עודף ניטראט) הנובע מכך שמקור האלקליניות הם אמוניה גזית וגיר. בניסוי חצי מהאלקליניות נבע מאמוניה וחצי מהגיר.

### 1.5 דיון

מערכת המוצע (שני ריאקטורים - אחד כימי עם זרימה לא רוויה לספיחת אמוניה והשני ביולוגי) מסוגלת להרחיק ולטפל באמוניה מהאוויר מלולים למשך זמן ממושך (לפחות 30 יום), כאשר גיר משתמש כמקור לאלקליניות ועם יצירת קלציום ניטראט המשמש כדשן לחקלאות. ריכוז אמוניה גזית ביציאת המערכת היה נמוך מסף המדידה (1 חלפ"מ). המערכת מאופיינת בהשקעה נמוכה באנרגיה ובחומרים כימיים.

עבור תנאים המקובלים בלולים ובכול תנאי העבודה שנבדקו (ספיקות אוויר, ריכוז אמוניה וערך הגבה בפאזה הנוזלית) נמצא מעבר מלא של האמוניה מהפאזה הגזית (האוויר המזוהם) לנוזלית במערכת הכימית, כאשר עומס האמוניה המירבי במערכת נמצא כ-10 ג"ר אמוניה לליטר ריאקטור ליום, שהתקבל בערך הגבה 4.0 ומהירות אוויר 8.6 ס"מ לשנייה. בספיקות אוויר גבוהות יותר נמצא שנדרשת הגדלת גובה הריאקטור לקבלת הרחקה מלאה של האמוניה מהפאזה הגזית

באותם תנאים של ריכוז אמוניה בפאזות גזית ונוזלית, אך, בפועל זמן השהיה של האוויר במערכת נמוך קצר יותר, דבר המאפשר עומס אוויר גבוה יותר.

תוצאות המודל שנבנה לצורכי תכנון מערכת מעבר אמוניה מהפאזה הגזית לנוזלית בתנאים שונים הינם דומים לתוצאות הניסויים והוכח שניתן להשתמש בו לתכנון מערכות שונות.

בריאקטור עם גיר המשמש כנשא וכמקור האלקליניות לחיידקים ניטריפיקנטים נמצא שאכן ניתן לבצע ניטריפיקציה כשמקור האלקליניות הוא מהמסת אבן הגיר בריכוזי סידן של 1%.

עבור תנאים המקובלים בלולים ובכול תנאי העבודה שנבדקו (ספיקות אוויר וריכוז אמוניה בפאזה הגזית) נמצא שבתוספת אלקליניות ממקור חוצוני (מסוג סודיום בי-קרבוניט) ריאקטור ביולוגי לטיפול באמוניה מסוגל לספוג ולחמצן אמוניה במלואה בריכוז אמוניה של עד עומס של 0.29 גרם אמוניה לליטר ריאקטור ליום, כאשר ספיקת אוויר הייתה 18 ו-41 ליטר לדקה.

מערכת מסוג כזה מסוגל להתמודד עם שינויים פתאומיים בריכוז אמוניה בפאזה הגזית, קודם ריכוז אמוניה בפאזה הנוזלית עולה ובהמשך חיידקים ניטריפיקנטים מתרבים עד שקצב פירוק האמוניה שווה לקצב הכנסת אמוניה למערכת. קצב מרבי להרחקת אמוניה הוא 350 מ"ג אמוניה לליטר ריאקטור ליום.

#### **1.6 ביבליוגרפיה**

[1] Galloway, J. N. (1998) The global nitrogen cycle: changes and consequences.

*Environmental Pollution* 102, 15-24.

[2] [www.sviva.gov.il](http://www.sviva.gov.il)

[3] Mor, T. (2006) Removal of  $\text{NH}_3(\text{g})$  from broiler house emissions and its subsequent use as fertilizer. Mater Thesis- Technion, Israel.

[4] Melse, R. W., Ogink, N. W. (2005) Air Scrubbing Techniques for Ammonia and Odor Reduction at Livestock Operations: Review of On-Farm Research in the Netherlands. *ASAE*, 48(6):2303-2313.

[5] Chen, Y., Yin, J., Wang, K. (2005) Long-term operation of biofilters of biological removal of ammonia. *Chemosphere* 58(8), 1023-1030.

[6] Wheeler, E. F., Casey, K. D., Gates, H., Xin, J. L., Zajaczkowski, P. A., Topper, P. A., Liang, P. A., Pescatore, A. J. (2006). Ammonia Emissions from Twelve U.S. Broiler Houses. *ASAE*, 49(5):1495-1512.

- [7] Haug, T.R., McCarty, L.P. (1972) Nitrification with submerged filters. Journal WPCF 44(11). 2086-2102.

### סיכום עם שאלות מנחות

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).  
שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.  
**הערה:** נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
פיתוח מערכת ביולוגית חדשנית ויעילה לטיפול בפליטת אמוניה מלולים למניעת ריחות רעים, זיהום אוויר, קרקע ומים וליצירת דשן חנקתי עם הוצאות נמוכות יחסית.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
מערכת המוצע מסגלת להרחיק ולטפל באמוניה מהאוויר מלולים למשך זמן ממושך (לפחות 30 יום), כאשר גיר משמש כמקור לאלקליניות (חלקית) ועם יצירת קלציום ניטראט המשמש כדשן לחקלאות. ריכוז אמוניה גזית ביציאת המערכת היה נמוך מ-1.0 חלפ"מ. המערכת מאופיינת בהשקעה נמוכה באנרגיה ובחומרים כימיים.
אין השפעת ערך הגבה של הנוזל לקליטת אמוניה והאלקליניות לתהליך נובע מהגיר ומהאמוניה גזית מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
ניתן ליישם את המערכת בלולים בארץ ובעולם. מטרות המחקר הושגו.
בעיות שונות לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר. בעיה היחידה שונתרה ללא פיתרון היא הייבוש של הנוזל העשיר עם קלציום ניטראט.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: <b>פרסומים בכתב</b> - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; לא, אנו מתעתדים לכתוב מאמר מדעי עם תוצאות שהתקבלו עד כה.
פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)
← רק בספריות
← ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
← חסוי לא לפרסם