Disel SCR Control

1/12/2024

Part 1

בפרויקט זה נעסוק בבקרה מסוג EATS זוהי בקרה המתייחסת לתהליכים ולמנגנונים שמשמשים לוויסות וייעול ביצועי מערכות שמטפלות בגזי פליטה בעיקר ממנועים המבוססים על דלק.

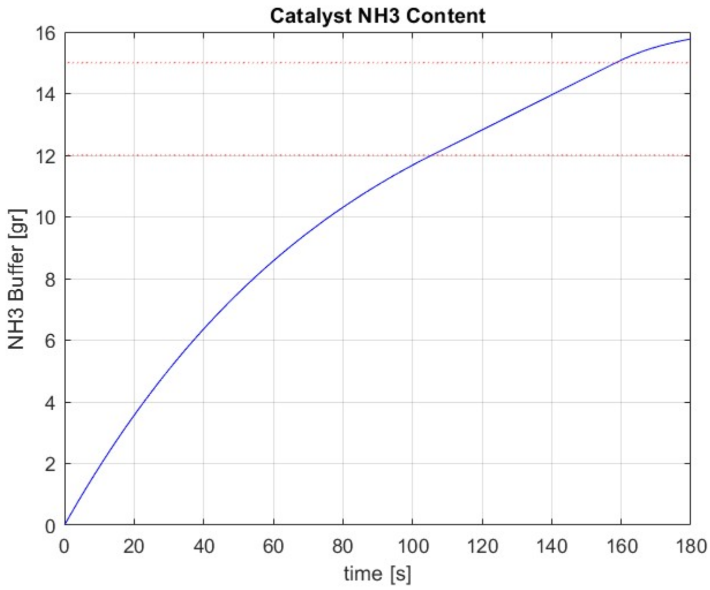
Assignment 1 – Exploring catalyst dynamics using VTC simulation

1. נתבקשנו להריץ סימולציה עבור המודל הכימי. המודל הכימי בקטליזטור מתמקד בהפחתת NO_x בדרך כלל ע"י NH_3 (אמוניה) כחומר מפחית. תהליך זה מבוצע במערכת SCR באמצעות זרימת הגזים החמים מהמנוע דרך קטליזטור שבו האמוניה מגיבה עם NO_x , מפרקת אותו ומפחיתה את כמותו. דרשנו עבור הסימולציה את הקבועים הבאים:

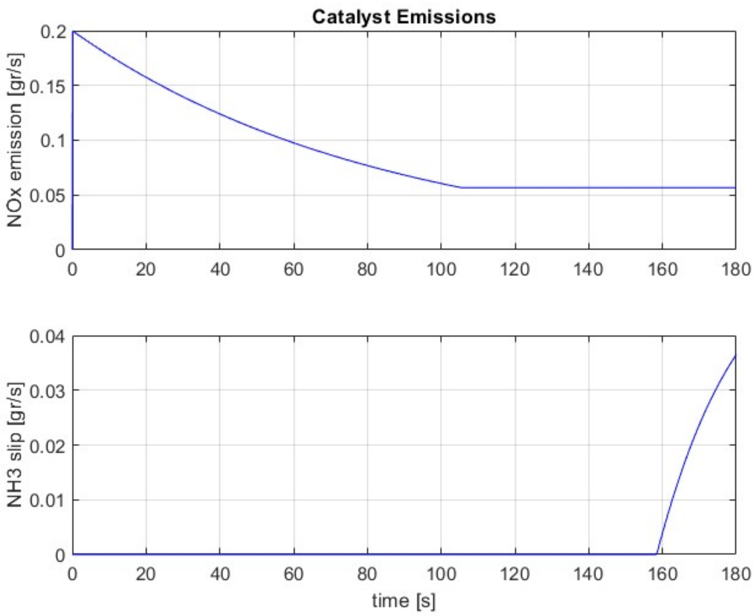
$$emf = 0.1 \left[\frac{kg}{s}\right]$$
$$inNOx = 0.2 \left[\frac{gr}{s}\right]$$
$$inNH_{3_{dem(t)}} = 0.2 \left[\frac{gr}{s}\right]$$

כאשר הנתונים שהשתנו מסימולציה לסימולציה היו טמפרטורת המודל *T(s)* וכמות NH_3 שנאגר בתוך ה-*SCR*. כל סימולציה הרצנו למשך 3 דקות.

a. סימולציה עבור $T(s) = 190\ [°C]$ $\quad x_b(0) = 0\ [gr]$



איור 1: כמות NH_3 בתוך הבאפר



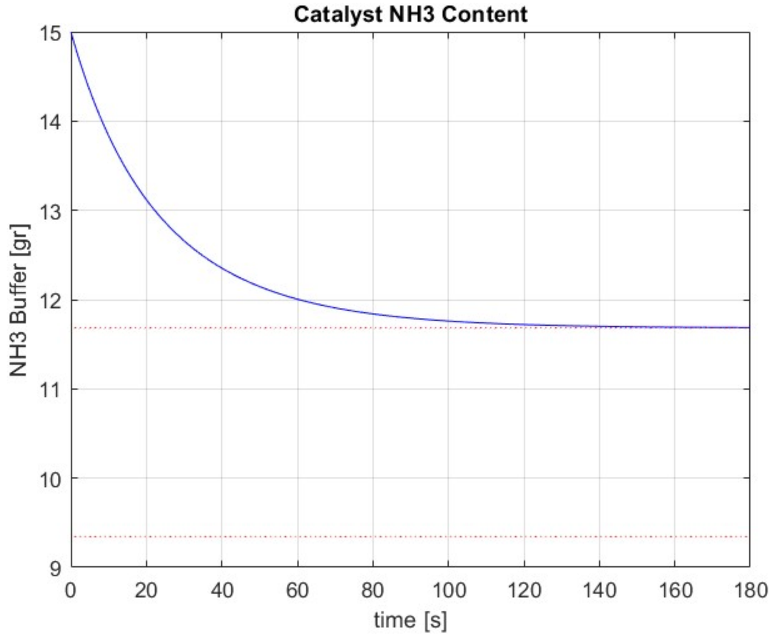
איור 2: גרפי פליטה ביציאה

כמות האמוניה (NH_3) שנדרש להכניס למערכת *SCR* תלויה בטמפרטורה של התהליך, מכיוון שפירוק ה- *Nox* ע"י האמוניה מתבצע באופן יעיל יותר בטמפרטורות מסוימות.

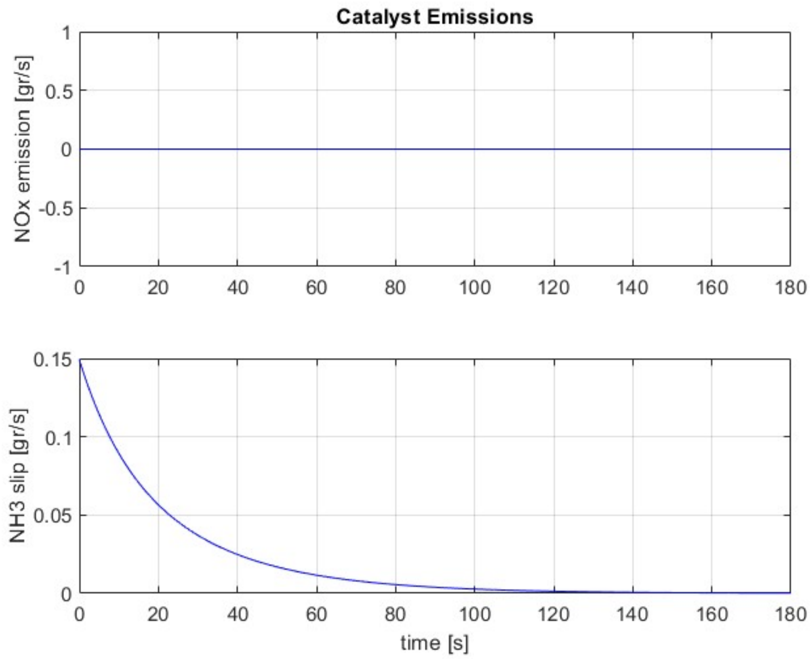
ניתן לראות כי עבור טמפרטורה $T(s) = 190\ [℃]$ כמות האמוניה שמצטברת ב-*Buffer* חוצה את המינימום הנדרש בערך ב- $t = 105\ [sec]$, ועד לזמן זה כמות האמוניה בבאפר נמצאת מתחת למינימום הנדרש. במצב שכזה כל האמוניה שנמצאת מגיבה עם NO_x ולכן היא אפסית אך לא כל ה- NO_x מגיב בהתאמה עם האמוניה, ולכן חלקו נפלט מהמערכת.

כמות האמוניה הנפלטת מתייצבת כאשר אנחנו חוצים את המינימום הנדרש לטווח הרצוי. זוהי כמות האמוניה ב-*Buffer* בטווח הזמנים שבין $105\ [sec] < t < 160[sec]$. מעבר ל-160 שניות אנו עוברים את המקסימום האפשרי לאמוניה בבאפר ולכן בחלקו הוא נפלט החוצה.

b. סימולציה עבור $T(s) = 220\ [^\circ C]$ $\quad x_b(0) = 15\ [gr]$



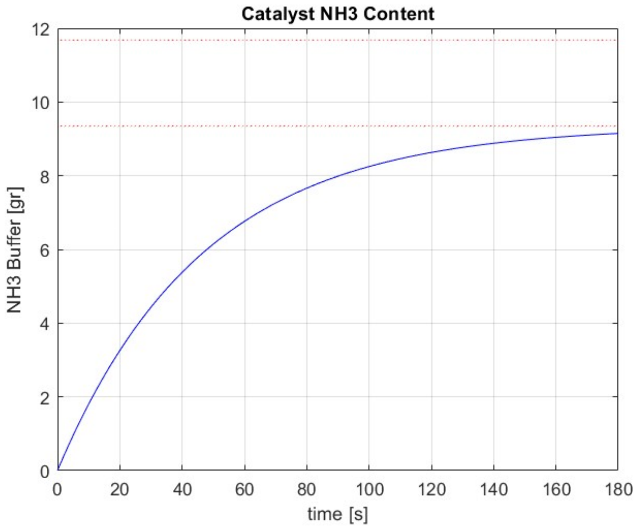
איור 3: כמות NH_3 בבאפר



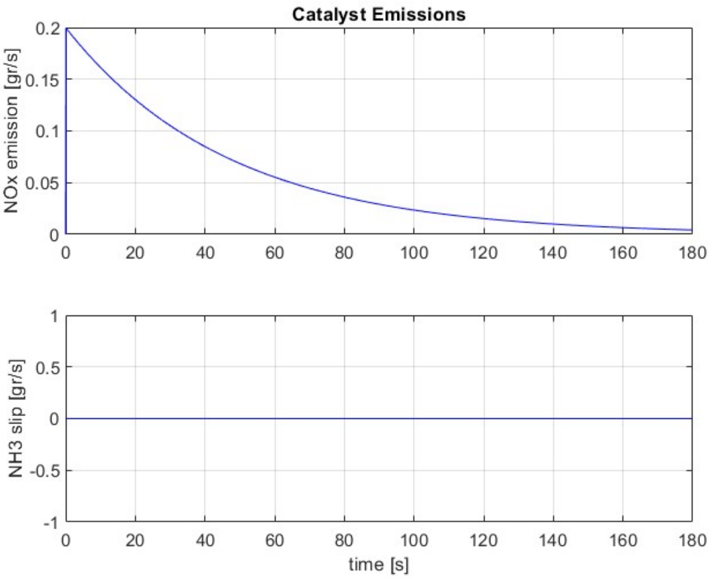
איור 4: גרפי פליטה ביציאה

ניתן לראות כי עם שינוי הטמפרטורה מ- $190\ [℃]$ ל-$220\ [℃]$ התגובה הכימית במערכת השתפרה. בטמפרטורה גבוהה יותר, הקטליזטור במערכת *SCR* עובד בצורה יותר יעילה, מכיוון שטמפרטורה גבוהה יותר מגבירה את קצב התגובה ומאפשרת לחומר להפעיל את התגובה בצורה אופטימלית יותר. ניתן לראות כי לאורך כל התהליך כמות האמוניה
ב- *Buffer* הייתה מעבר למקסימום הנדרש וכתוצאה מכך, כל NO_x שבמערכת הגיב בצורה מלאה ולא נפלט החוצה. ניתן לראות כי בזמן $t \approx 100\ [sec]$ האמוניה הגיבה עם כל ה-NO_x שהיה במערכת והערך שלה בתוך ה-*Buffer* ירד לערך המקסימלי שהוא יכול להכיל ולכן לא נפלטה יותר אמוניה מהמערכת.

.c סימולציה עבור $T(s) = 220\ [℃]$ $\quad x_b(0) = 0\ [gr]$



איור 5: כמות NH_3 *בבאפר*



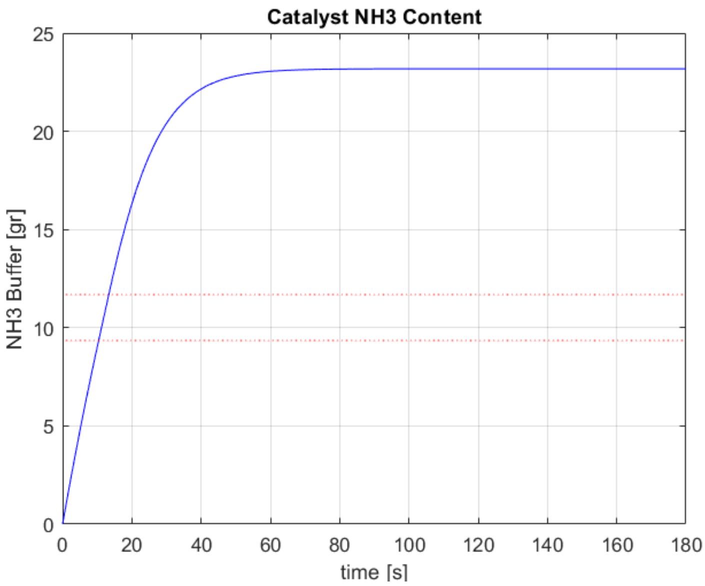
איור 6: גרפי פליטה ביציאה

במקרה הנ"ל נשארנו עם אותה טמפרטורה של כ- $220\ [°C]$ מהסימולציה הקודמת אך כמות האמוניה ההתחלתית בבאפר השתנתה והתחילה מ-0. גם במקרה זה, הטמפרטורה גבוהה, והקטליזטור במערכת *SCR* עובד בצורה יותר יעילה, מכיוון שטמפרטורה גבוהה יותר מגבירה את קצב התגובה ומאפשרת לחומר להפעיל את התגובה בצורה אופטימלית יותר. במקרה הנ"ל כמות האמוניה ב-*Buffer* הייתה מתחת למינימום הנדרש, משמע כל האמוניה הגיבה עם NO_x ולכן לא נפלטה החוצה. אבל, לא כל ה- NO_X הגיב עם האמוניה ולכן התקיימה פליטת NO_x לאורך כל התהליך.

הסקנו כי במקרה שבו הכמות ההתחלתית של האמוניה ב-*Buffer* הייתה מעל המקסימום הנדרש כל ה- NO_x יגיב עם האמוניה שיש ולכן NO_x לא יפלט מהמערכת, אבל מכיוון שהייתה לנו כמות מעל לערך המקסימלי שה- *Buffer* יכול להכיל במערכת האמוניה כן יכלה להיפלט מהמערכת.

אם זאת, כאשר כמות האמוניה הייתה מתחת למינימום הנדרש כל האמוניה הגיבה עם NO_x ולכן אמוניה לא נפלטה החוצה. אבל, מכיוון שלא כל ה- NO_x הגיב בהכרח עם האמוניה לאורך כל הדרך הוא כן יכול להיפלט מהמערכת בתהליך.

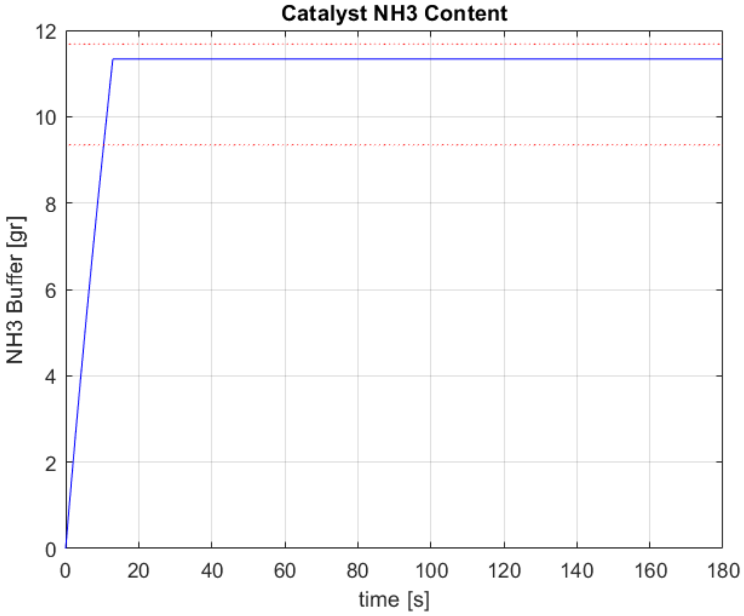
2. עבור הסימולציה $T(s) = 220\ [°C]$ $x_b(0) = 0\ [gr]$ נרצה לשנות את כמות הגז NH_3 הנכנסת למודל הכימי על מנת שכמות הגז הנפלט $outNO_x + outNH_3$ תהיה מינימלית כמה שאפשר. כלומר נרצה למצוא כמות אמוניה התחלתית מספקת בעזרתה נגיע במהלך התהליך לטווח האופטימלי של כמות אמוניה ב-*Buffer*. תחילה רצינו להשתמש בכמות הגבוה ביותר של אמוניה התחלתית על מנת להעלות את כמות האמוניה בבאפר הכי מהר שאפשר. במקרה הנ"ל מצאנו כי כמות האמוניה בבאפר נכנסת לתחום האידיאלי אחרי $13[sec]$ ולשם כך ביצענו מספר סימולציות למציאת ערך הזמן האופטימלי.



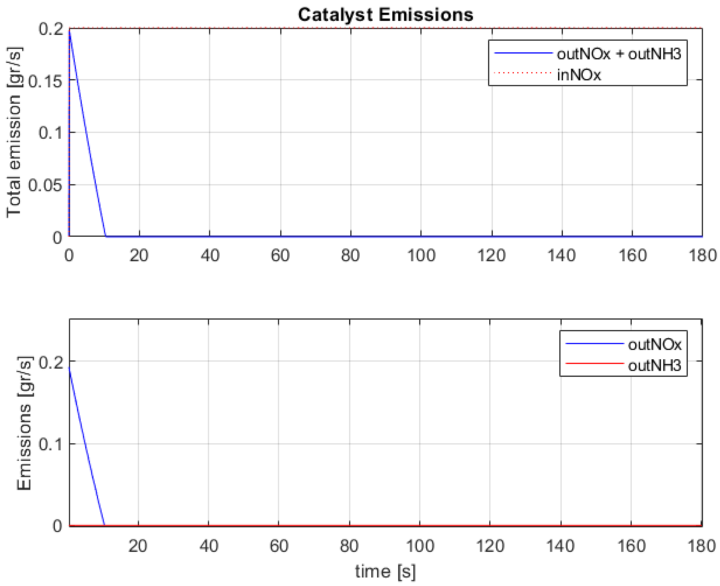
איור 7: כמות NH_3 *בבאפר כאשר* $NH_{3_{dem}} = 1$

לאחר מכן רצינו כי ערך האמוניה ב-*Buffer* יתייצב לערך האידיאלי ומצאנו כי בשימוש בשיטת הבקרה הנאיבית $NH_3dem = NO_X$ נתייצב מהר ככל הניתן ונוכל להישאר בטווח האידיאלי. לכן מצאנו כי כמות הגז NH_3 הנכנסת למודל הכימי על מנת שכמות הגז הנפלט $outNO_x + outNH_3$ תהיה מינימלית כמה שאפשר הינה:

$$NH_3\_dem = \begin{cases} 1 & t < 13[sec] \\ 0.2 & t \geq 13[sec] \end{cases}$$



איור 7: כמות NH_3 בבאפר האידיאלית למינימום גזי פליטה



איור 8: גרפי פליטה ביציאה

Assignment 2 – Exploring muffler thermal dynamics using VTC simulation

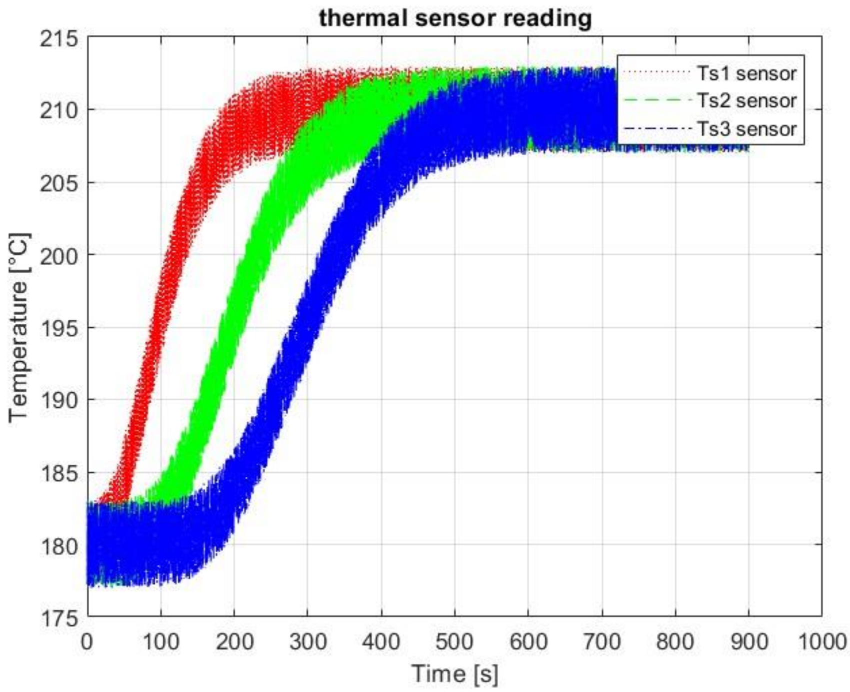
1. נתבקשנו להריץ סימולציה עבור המודל התרמי. דרשנו עבור הסימולציה את הקבועים הבאים:

$$emf = 0.1\left[\frac{kg}{s}\right]$$

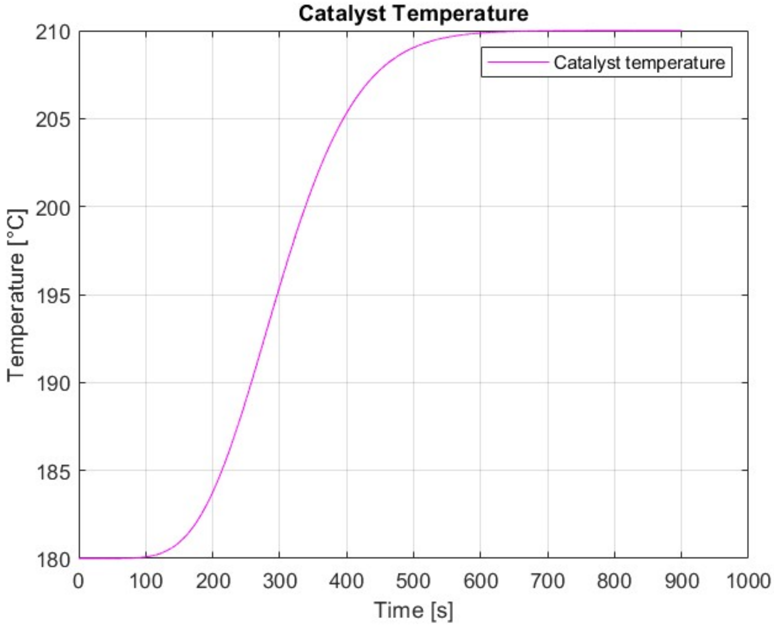
$$T_{int} = 180[℃]$$

כאשר הנתונים שהשתנו מסימולציה לסימולציה היו $T_{exh}(t)$ המשפיעה על היכולת של המערכת לשמור על חום או להעביר חום מהקטליזטור או ממערכות אחרות, ו-ΔT העוזרת להתאים את התהליכים התרמיים כדי לשמור על איזון, ולווסת את תוספת החום או את הורדת החום במערכת.

a. סימולציה עבור $T_{exh}(s) = 210\ [℃]$ $\quad \Delta T_{dem}(t) = 0[℃]$



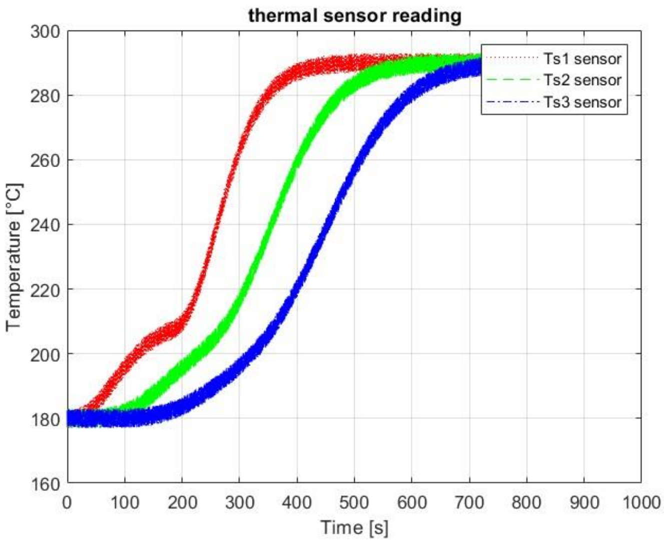
איור 9: קריאת טמפרטורות החיישנים עבור מקרה a



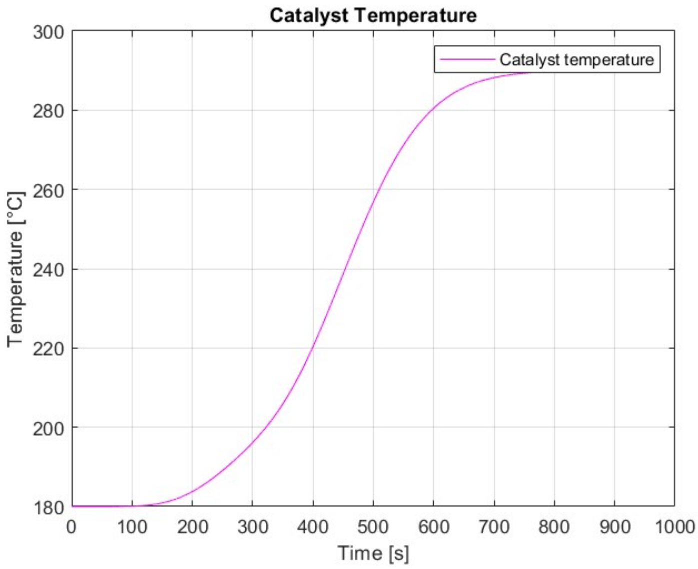
איור 10: קריאת טמפרטורת ה-catalyst עבור מקרה a

b. סימולציה עבור $T_{exh}(s) = 210\ [℃]$

$$\Delta T_{dem} = \begin{cases} 0[℃] & t < 3[min] \\ 120[℃] & t \geq 3[min] \end{cases}$$



איור 11: קריאת טמפרטורות החיישנים עבור מקרה b

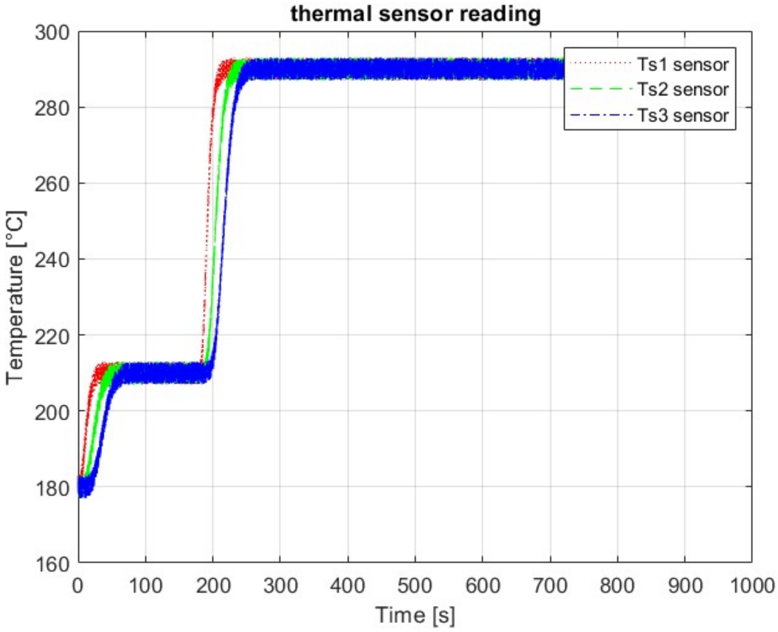


איור 12: קריאת טמפרטורת ה-catalyst עבור מקרה b

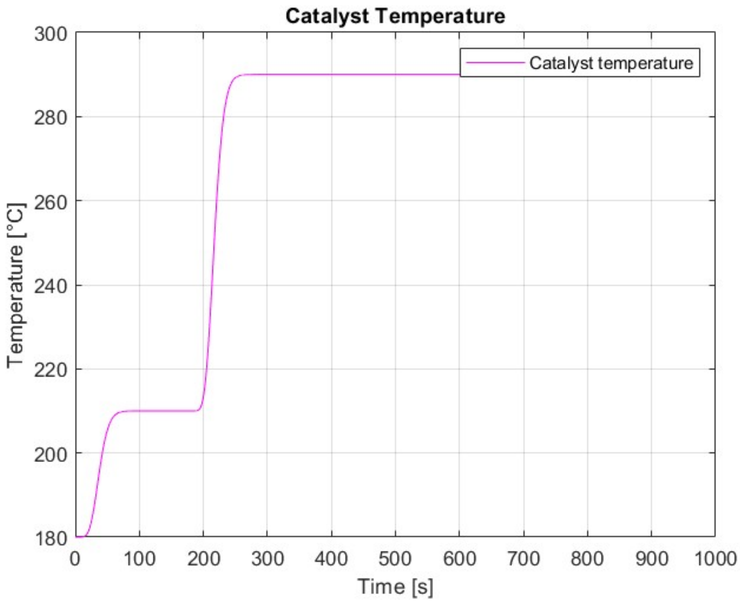
אנו יודעים כי הקשר $T_{in} = T_{exh} + \Delta T$ מתקיים במצב יציב, הכניסות והיציאות של החום נמצאות בשיווי משקל. הקשר הנ"ל מציין איזון או "הגעה למצב יציב" שבו המערכת לא חמה יותר או קרה יותר, כלומר, היא מתייצבת.

החיבור הזה עוזר לחשב את הטמפרטורה הנכנסת כטמפרטורה שבסופו של תהליך חום, המייצגת את המצב המתמיד שבו לא קיים שינוי נוסף בטמפרטורה. לכן על פי הציפייה במצב מתמיד נקבל $T_{ss} = T_{in} = T_{exh} + \Delta T = 210 + 120 = 330\ [°C]$ אך זהו אינו המקרה מכיוון שקיימת הדרישה: $0[°C] < \Delta T < 80[°C]$. לכן כפי שניתן לראות בגרף נצפה להגיע לטמפרטורה של $T_{ss} = T_{in} = T_{exh} + \Delta T = 210 + 80 = 290\ [°C]$

2. הפעם הרצנו את הסימולציה עבור מקרה b עבור $emf = 0.8 \left[\frac{kg}{s}\right]$



איור 13: קריאת טמפרטורות החיישנים עבור מקרה b כאשר emf =0.8



איור 14: קריאת טמפרטורת ה-catalyst עבור מקרה b כאשר emf=0.8

כעת, קצת זרימת מסת גזי הפליטה היה גבוה יותר. ניתן לראות לפי הקשר שמצאנו בהרצאה כי $\tau = \frac{1}{\alpha \cdot emf}$ כי ערך ה-*emf* משפיע על קבוע הזמן. ככל שה-*emf* הולך וגדל קבוע הזמן קטן משמע הערך מתכנס לערך מצב מתמיד מהר יותר. ניתן לראות כי עבור מקרה b ישנם שני ערכי התייצבות עבור שני ערכי ΔT כאשר עבור $\Delta T = 0$ הטמפרטורה מתייצבת לפני שעברו 3 דקות והערך השני של $\Delta T = 120$ התייצב גם כן יותר מהר לעומת מקרה *b*.

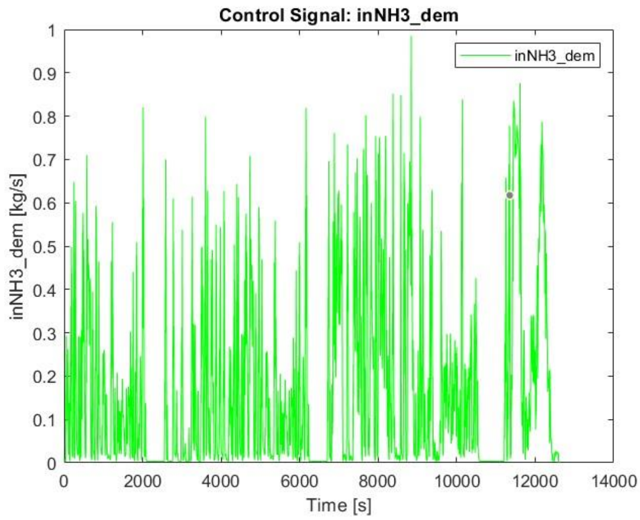
Assignment 3 – Exploring overall emission dynamics using VTC simulation

1. בסעיף זה כתבנו קוד ב-*MATLAB* לטובת הרצה של סימולציה משותפת עבור המודל הכימי והמודל התרמי. הנחנו מקרה של בקרה " נאיבית" :

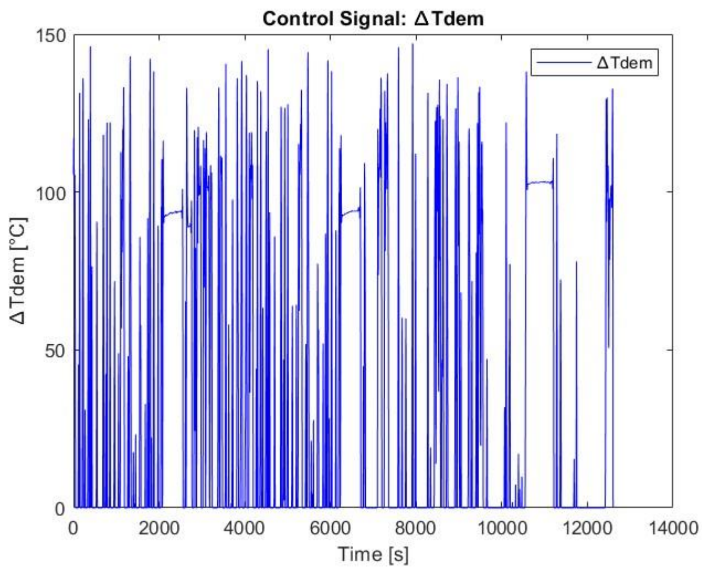
$$\Delta T_{dem}(t) = \max(0, 200 - T_{exh}(t))$$
$$inNH_{3_{dem}}(t) = inNO_x(t)$$

הרצנו את הסימולציה עבור המידע שקיבלנו בקובץ *'Cycle1'*.
נציג את הממצאים שקיבלנו:

- אות הבקרה $inNH_{3_{dem}}(t)$:

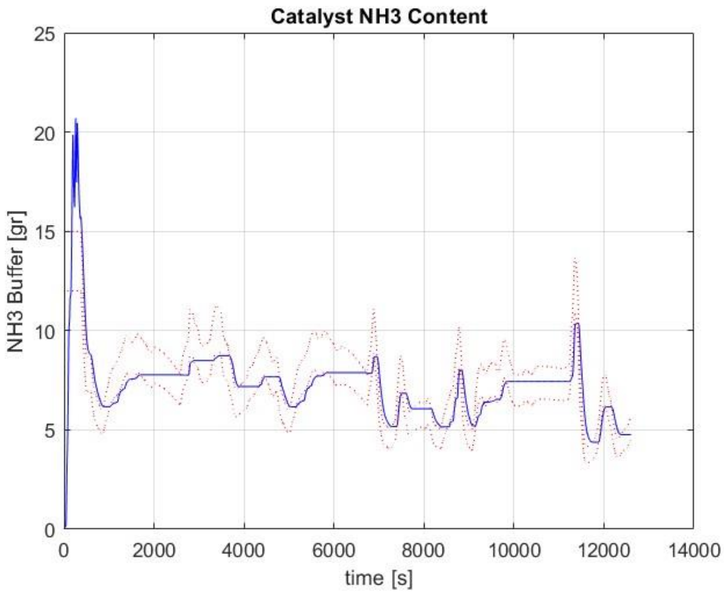


- אות הבקרה $\Delta T_{dem}(t)$:



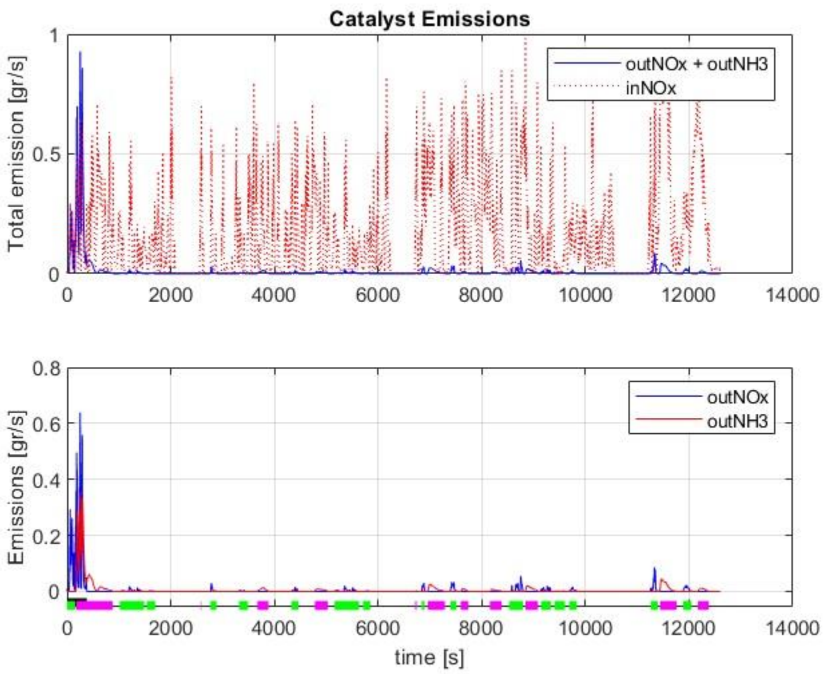
איור 15: אותות הבקרה

- כמות NH_3 בתוך הקטליזטור:



איור 16: כמות NH_3 בבאפר

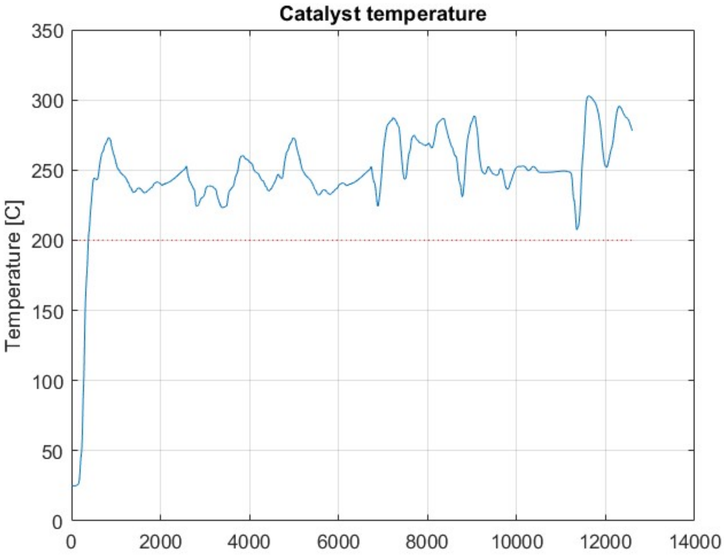
- גזי פליטה מהקטליזטור:



איור 17: גזי הפליטה

.

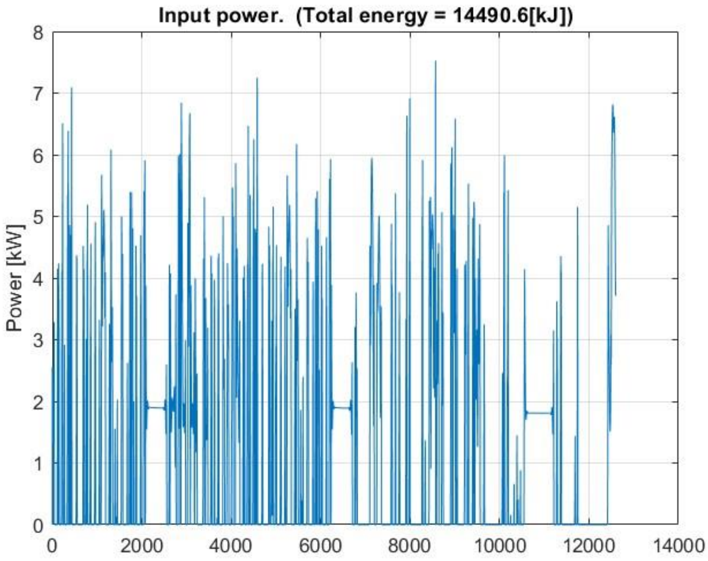
- טמפרטורת הקטליזטור:



איור 18: טמפרטורת ה-catalyst

ניתן לראות כי על אף היותה של הבקרה נאיבית כמות הגז הנפלט הלא רצוי הנפלט ביציאה ירד משמעותית והתקיים מעקב יציב של כמות ה-NH_3 בתוך ה-*Buffer* כך שלאורך כל הדרך הבקרה השתדלה לשמור על כמות האמוניה בטווח היציב. אם זאת ניתן לראות כי רוב הזמן הטמפרטורה בקטליזטור הייתה מעל לטמפרטורה המקסימלית הרצויה שהינה 200 מעלות וכי אף הגיע כד לכ-300 מעלות בשיאה. בנוסף אנו יודעים כי טמפרטורה גבוה יותר מפחיתה את כמות האמוניה ב-*Buffer* ומעודדת דליפה של אמוניה החוצה.

2. עלות האנרגיה התרמית של כל התהליך המבוקר בבקרה "נאיבית" מוצגת בגרף הבא:



איור 18: עלות אנרגטית של תהליך הבקרה

ניתן לראות כי עלות תפעול הבקרה הנאיבית הינו גבוה במיוחד שכן שינוי אות הבקר ΔT בכל פעם שטמפרטורת ה-T_{exh} הייתה קטנה מ-200 מעלות עלה בתשלום אנרגיה גבוה למערכת.

Assignment 4 – Thermal model identification

.1

.a במודל תרמי של 15 אבני בניין, כל אבן מדמה אזור מסוים של מערכת תרמית. נתון כי $conv_i = 1$ זהו מקדם מעבר החום בין אבן אחת לשנייה. ההנחה היא שכל האבנים במודל התרמי שוות בגודלן ובמאפיינים שלהן ולכן כולן משתמשות באותו מקדם מעבר חום. בסעיף הנ"ל מבקשים לבצע זיהוי של קיבול תרמי יחסי α של אבן אחת מתוך במודל התרמי בין 15 האבנים.

תחילה נבצע הרצה של מודל תרמי בן 15 אבנים עם ערך שרירותי של α עבור המקרה שתואר בסעיף $(a.1)/2$:

$emf = 0.1 \left[\frac{kg}{s}\right]$

$T_{int} = 180\ [°C]$

$T_{exh} = 210[°C]$

$\Delta T_{dem} = 0[°C]$

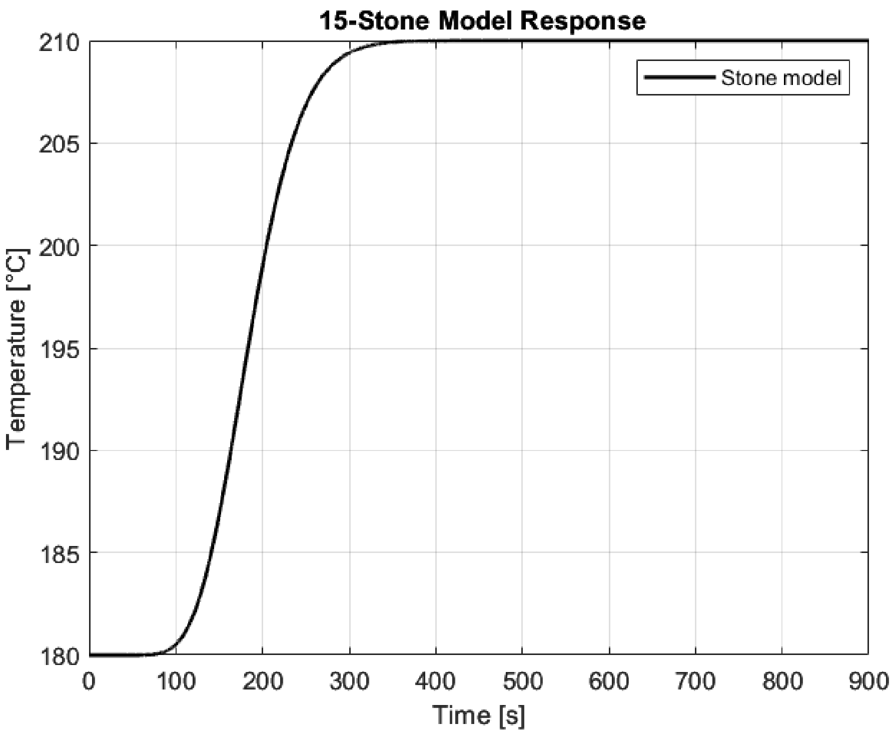
במקרה הנ"ל השתמשנו בערך שרירותי לפי בחירתנו של $\alpha = 0.1$:

נבצע סימולציה עבורה השתמשנו בקשר שמצאנו בהרצאה :

$$T(s) = T_{in} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s}{\alpha \cdot emf} + 1\right)^{15}}$$

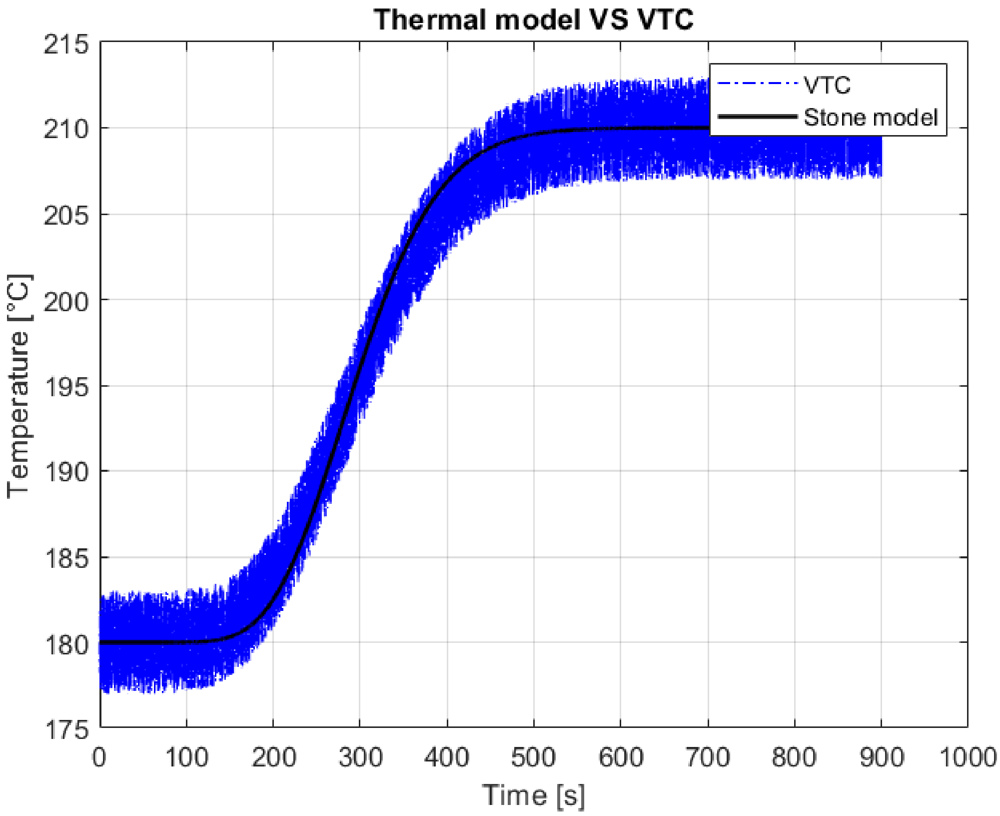
$T_{in} = T_{exh} + \Delta T$

בתוצאות הגף הצגנו את הערך של הטמפרטורה ביציאה מהאבן האחרונה:



איור 19: מודל 15 האבנים בהצגת טמפרטורת היציאה מהאבן ה-15 עבור $\alpha = 0.8$

b. כעת נרצה להשוות את הטמפרטורה ביציאה של ה-*catalyst* מתוך המודל התרמי של 15 האבנים לבין הטמפרטורה ביציאה שקיבלנו מהסימולציה עבור חיישן T_3.
קיבלנו כי עבור $\alpha = 0.5$ ההתאמה בין הגרפים הייתה הטובה ביותר.



איור 20: השוואה בין מודל האבנים לתוצאות T3 VTC

2. נרצה למצוא את המטריצות B A עבור משוואת מרחב המצב שפיתחנו

$$\dot{T} = \left(T_{i-1} - T_i\right) \cdot \alpha \cdot emf$$

מכאן הגענו לפיתוח מטריצות מרחב המצב:

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha \cdot emf & 0 & \dots & 0 \\ \alpha \cdot emf & -\alpha \cdot emf & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \cdot emf & -\alpha \cdot emf \end{bmatrix}$$

שכאשר נשתמש בנתונים שקיבלנו בסעיף הקודם:

$\alpha = 0.04$
$emf = 0.1$

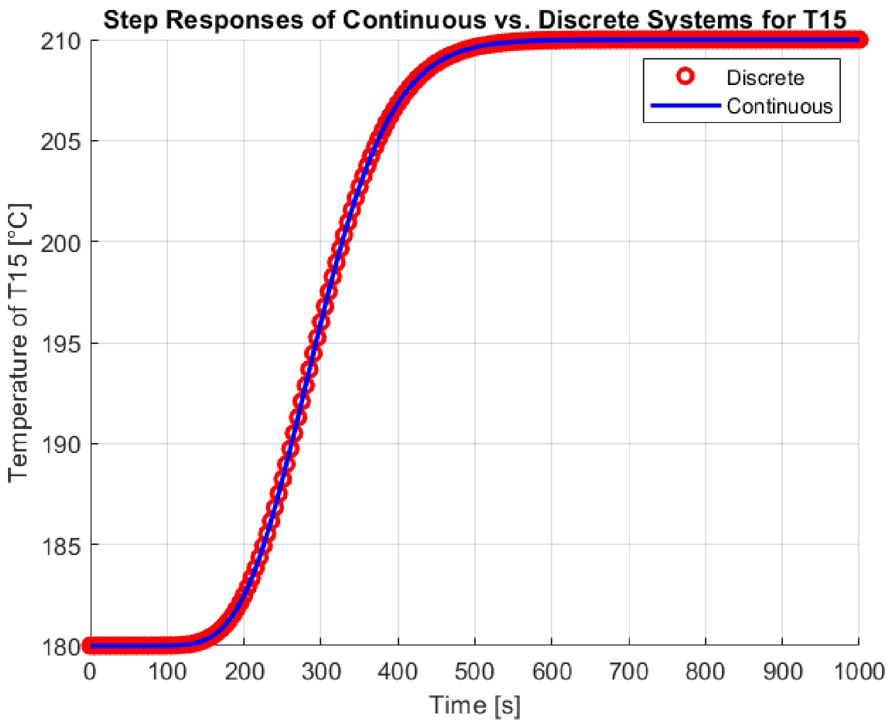
A:

$$\begin{pmatrix}
-\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{250} & -\frac{1}{250}
\end{pmatrix}$$

B:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{250} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

3. כעת נרצה למצוא עבור אותם נתונים את המטריצות הדיסקרטיות B_d , A_d.
את A_d מצאנו על פי המעבר למטריצה דיסקרטית : $A_d = e^{A\cdot emf\cdot ts}$.
את המטריצה B_d מצאנו לפי הקשר $B_d = A^{-1}(emf)\cdot(A_d - 1)\cdot B$.
נשווה בין המקרה הדיסקרטי למקרה הרציף על גבי הגרף.



איור 21: השוואה בין מרחב מצב רציף לדיסקרטי

ניתן לראות כי קיימת התאמה בין הגרפים וכי ההבדל הוא נקודות הדגימה הבדידות.