

עיבורים

מכשור ומדידות

13/02/2013

Ben Gurion University

הוראות בטיחות:

- המעבדות הן שטח תפעולי המשופע בעצמים חמים וזרמי חשמל גבוהים.
- מותר לסטודנטים לעבוד במעבדה רק כאשר נמצא במקום עובד מסגל המעבדה ו/או מדריך מוסמך אשר מודע לניסוי אותו הם מבצעים .
- אין להכניס למעבדה מזון ושתייה. אין לאכול, לשתות או לעשן במעבדה. אסור להשתמש בטלפונים סלולריים בתוך המעבדה (המעבדה היא שיעור לכול דבר)
- לבעלי שיער ארוך- חובה לאסוף את השער בכניסה לכל חדר מעבדה או ניסוי ולהכניסו מתחת לחולצה
- אין לעבוד עם שרוולים ארוכים ולא רכוסים ו/או בגדים רפויים
- סטודנט שלא יגיע עם נעליים סגורות -היינו נעליים סגורות באופן מלא גם מלפנים (אצבעות רגליים) וגם מאחור (קרוסול חשוף) לא יוכל לבצע המעבדה ולא יקבע לו שיבוץ מחדש. הערה- אין להגיע עם נעלי "CROCS" למעבדות
- בכל מקרה של ספק או חשש בהפעלה של מערכת הניסוי יש להתייעץ עם המדריך או איש הסגל האחראי. חל איסור חמור על הפעלת מערכות ניסוי ללא אישור טכנאי או מדריך ו/או במידה ויש ספק או חשש.
- לא יקבע מועד שיבוץ חדש לסטודנט אשר לא ימלא חובות אלו

- חל איסור על הישענות על השולחן
- הקפד על סביבת עבודה נקייה- ציוד שאינו בשימוש, החזר אותו למקומו.
- מקם את המכלול בצורה חזקה ע"י הבורג
- אל תסובב את חוגות מד המעוות אלא בהוראה מפורשת
- כלי המדידה הם כלים עדינים ויקרים –התנהג בהתאם
- העמס את המשקלים בעדינות
- לא יודע כיצד להפעיל? קרא למדריך או טכנאי.



מדידת עיבור

מגישי הדו"ח: 1. _____ ת.ז. _____
2. _____ ת.ז. _____
3. _____ ת.ז. _____

מספר קבוצה: _____
תאריך ביצוע המעבדה: ____/____/____
תאריך הגשת המעבדה: ____/____/____

מפתח לבדיקת הדו"ח

מתור	ניקוד	סעיף
2		מטרה ומהלך הניסוי
5		רקע תיאורטי ומכשירי מדידה
8		תוצאות מדידה
8		גרף $\sigma = f(\varepsilon)$
5		חישוב E מתוך הגרף $\sigma = f(\varepsilon)$
8		גרף $y = f(P)$
5		חישוב E מתוך הגרף $y = f(P)$
5		השוואה בין E מסעיפים 1,2 ומהספרות
5		גרף לחישוב ν
5		חישוב ν מתוך הגרף הנ"ל
5		חישוב הקיזוזים והמעוות בחצי גשר (א.ע+א.ת)
5		חישוב הקיזוזים והמעוות בגשר מלא
4		חישובי שגיאה עבור הגרף 1 - E מסעיף 1
3		הצגת השגיאה על הגרף של סעיף 1
4		חישובי שגיאה עבור הגרף 2 - E מסעיף 2
3		הצגת השגיאה על הגרף של סעיף 2
15		מסקנות והשוואה לתיאוריה
5		סיכום
100		סה"כ דו"ח

שמות הסטודנטים	ציון בוחן	ציון דו"ח מכין	ציון עיבוד תוצאות	ציון סופי
15%				
15%				
70%				
100%				

חתימת הבודק: _____



תדריך מעבדה - מדידת עיבור

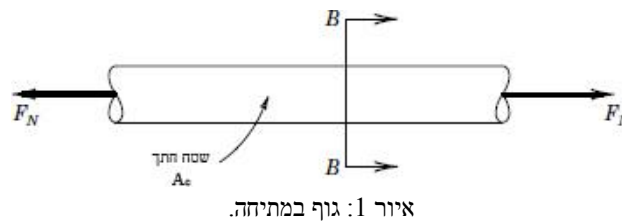
1. מטרה

- הכרת השימוש במדידי עיבור (strain gauge) ובגשר למדידת מעוותים.

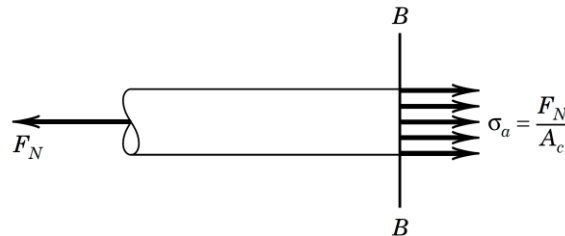
2. רקע

2.1 מאמץ ומעוות

תחילה, נגדיר את הקשר בין מאמץ (וכוח) למעוות. נתבונן באיור 1, המתאר מוט אשר מופעלים עליו כוחות מתיחה.



ברור כי הגוף נמצא בשיווי משקל, כלומר הוא במצב סטטי. נחתוך עתה את הגוף בחתך B-B ונסתכל על החלק השמאלי. מכיוון שכל הגוף נמצא במצב סטטי, ברור כי גם חלקו השמאלי של הגוף נמצא במצב סטטי - כלומר פועל כוח פנימי בתוך הגוף אשר מאזן את הכוח החיצוני. אם נחלק את הכוח הפנימי בשטח החתך נקבל כוח ליחידת שטח (איור 2) הנקרא **מאמץ** ומסומן בדר"כ ב - σ .



איור 2: דג"ח לחתך של גוף הנמצא במתיחה.

בדוגמא זו, הכוח הדרוש לאיזון הגוף יהיה F_N , שטח החתך הוא A_c ולכן המאמץ יהיה $\sigma_a = F_N / A_c$. כתוצאה מהפעלת הכוח על המוט יתארך (או יתקצר אם נפעיל כוחות לחיצה) בשיעור של ΔL . המעוות, המסומן בדר"כ ב - ε מוגדר להיות:

$$\varepsilon_a = \Delta L / L \quad (1)$$

כאשר L הוא האורך ההתחלתי של המוט, ΔL הוא השינוי באורך המוט ($\Delta L = L_{sp} - L$) והאינדקס a מסמל כי המעוות הוא בכיוון הציר (axial). מעוות חיובי הוא מעוות כתוצאה ממתחה - משום שהאורך הסופי גדול מההתחלתי, ומעוות שלילי הוא מעוות כתוצאה מליחצה - משום שהאורך הסופי קטן מהאורך ההתחלתי. במרבית החומרים בהם מתעסקים בהיבטים הנדסיים, כגון סגסוגות של מתכות ופלדות, ההתארכות היא קטנה מאוד וכך גם המאמץ. המעוות נמדד לרוב ביחידות של $10^{-6} m/m$, אך לשם נוחות משתמשים ביחידה חסרת מימדים הנקראת מיקרו-סטריין (microstrain) ומסומנת ב- $[\mu s]$.



לדוגמא, עבור מוט בעל אורך התחלתי של $1m$ שהתארך ב- $10^{-6}m$, המעוות שנקבל לאחר הצבה במשוואה (1) יהיה $\varepsilon_a = 10^{-6} m/m = 1\mu s$.

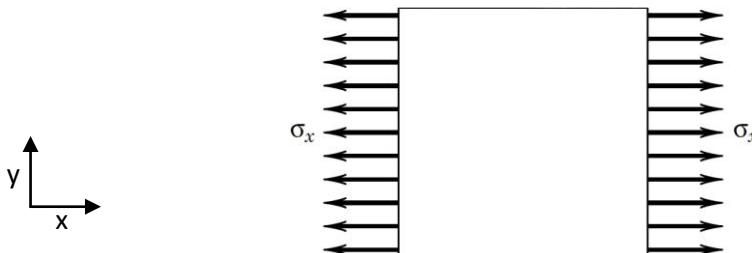
2.2 חוק הוק, מודול יאנג ויחס פואסון

בניסוי זה נתעסק רק במעוותים אלסטיים, כלומר כשנפסיק להפעיל את הכוח F_N המוט יחזור לאורכו ההתחלתי. בתחום האלסטי, הקשר בין המעוות למאמץ הוא קשר ליניארי והוא נתון ע"י חוק הוק:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

כאשר E הוא מודול האלסטיות של החומר, הנקרא גם מודול יאנג. מודול יאנג הוא תכונה של החומר, כלומר הוא משתנה מחומר לחומר ויחידותיו הן יחידות של מאמץ.

איור 3 מתאר את הדג"ח עבור אלמנט שטח מתוך הגליל המתואר באיור 1:



איור 3: דג"ח לאלמנט של גוף במתיחה.

ברור כי גם אלמנט השטח הנ"ל יתארך, ומשום כך הגובה של אלמנט השטח יקטן. כלומר, כתוצאה מהפעלת כוח בכיוון x בלבד נקבל מעוות בכיוון x ומעוות נוסף בעל סימן הפוך בכיוון y . בקשר בין המעוותים הללו נתון ע"י יחס פואסון המסומן ב- ν :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3)$$

בדומה למודול יאנג, גם יחס פואסון הוא תכונה של החומר, אך הוא חסר יחידות.

2.3 מדידי עיבור מתכתיים

כדי להבין כיצד עובד מדיד עיבור מתכתי נתבונן בתיל מוליך. התנגדותו של מוליך זה היא:

$$R = \rho_e L / A_c \quad (4)$$

כאשר ρ_e היא ההתנגדות הסגולית של החומר, L אורך המוליך ו- A_c שטח החתך שלו. ממשווא (4) ברור כי יש קשר בין שינוי באורך המוליך לבין התנגדותו. בכדי לקבל קשר זה נבטא את הדיפרנציאל השלם של (4) ותחת ההנחה כי ההתנגדות הסגולית של החומר לא משתנה נקבל את הקשר בין המעוות לבין שינוי ההתנגדות היחסית:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} (1 + 2\nu) \quad (5)$$

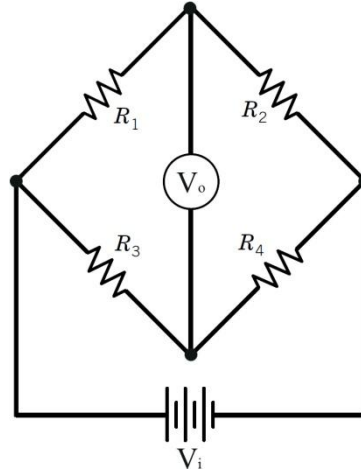
לרוב, המקדם של dL/L נתון ע"י יצרן מדיד העיבור ונקרא **Gauge Factor** (או בקיצור G.F). נכתוב את (5) בצורה זו ונקבל:



$$\frac{dR}{R} = G.F \cdot \frac{dL}{L} = \delta \quad (6)$$

2.4 גשר וויטסטון ומדידת עיבורים

גשר וויטסטון הוא חיבור של נגדים בצורה הבאה:



איור 4: גשר וויטסטון

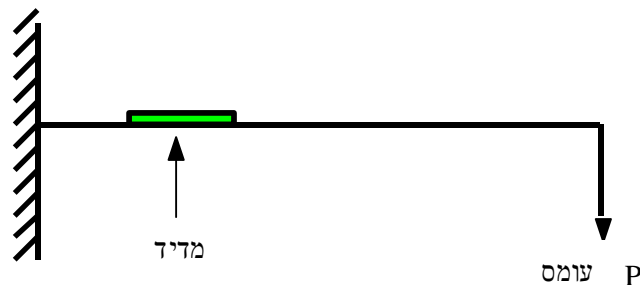
עבור מתח כניסה V_i , מתח המוצא V_o המתקבל נתון ע"י:

$$V_o = V_i \cdot \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (7)$$

כל אחד מהנגדים בגשר יכול להיות נגד קבוע או מדיד עיבור פעיל שהתנגדותו משתנה. כאשר אנו רוצים למדוד מעוות, ניתן להשתמש בחיבור "רבע גשר", "חצי גשר" או "גשר מלא". בחיבור של "רבע גשר", הנגד R_1 הוא מדיד עיבור פעיל ושאר הנגדים הם קבועים ושווים. בחיבור של "חצי גשר" שני הנגדים R_1, R_2 הם מדידי עיבור ושני הנגדים הנותרים הם קבועים ושווים. בחיבור של "גשר מלא" כל ארבעת הנגדים הם מדידי עיבור.

2.4.1 רבע גשר

נתבונן באיור 5 המתאר קורה אשר מופעל עליה העומס P וממוקם עליה מדיד עיבור יחיד הרגיש למעוות אורכי:



איור 5: קורה מועמסת עם מדיד עיבור יחיד.



נסמן ב- R_0 את התנגדות מדיד העיבור במצב ההתחלתי (לפני הפעלת הכוח P), ב- ΔR את השינוי בהתנגדות כתוצאה מהפעלת הכוח וב- R את התנגדות המדיד במצב העמסה. נוכל לרשום כי התנגדות המדיד נתונה ע"י:

$$R = R_0 + \Delta R \quad (8)$$

נשתמש במשוואות (5) ו- (8) לקבלת הביטוי הבא:

$$R = R_0(1 + \delta) \quad (9)$$

את המדיד שעל הקורה נחבר במקום הנגד R_1 . את שלושת הנגדים הנותרים נכוון להיות R_0 . נציב ביטויים אליו למשוואה (7) ונקבל:

$$V_0 = V_i \frac{R_0(1 + \delta)R_0 - R_0R_0}{[R_0(1 + \delta) + R_0](R_0 + R_0)} = V_i \frac{R_0^2(1 + \delta - 1)}{2R_0^2(1 + \delta + 1)} = V_i \frac{\delta}{2(2 + \delta)} \quad (10)$$

ניזכר כי δ נמדד ביחידות של μs ולכן $\delta \ll 1$, לכן נוכל להזניח את δ במכנה ביחס ל 2 ונקבל:

$$V_0 = V_i \frac{\delta}{4} \quad (11)$$

מכיוון שבמכשיר המדידה בו נהוג להשתמש מודדים מעוותים בדר"כ בצורה המתוארת לעיל, הרי המכשיר מבצע פעולות חשבוניות כדי שנקבל ישירות את δ . המכשיר מודד את V_0 (פוטנציומטר), מחלק בערך הידוע של V_i ומכפיל ב- 4 בכדי לתת ישירות את המעוות (הערה: אם ניזכר משוואה (6) נראה כי יש לחלק את התוצאה ב- GF, אך למעשה בעת איפוס המכשיר אנו מזינים את ה- GF כך שהמכשיר מבצע את הפעולה והתוצאה המתקבלת היא העיבור ε):

$$\delta = 4 \frac{V_0}{V_i} \quad (12)$$

המכשיר מבצע את הפעולה הנ"ל (12) בכל צורת חיבור, לכן נרצה למצוא את גורם הגשר. גורם הגשר הוא מספר בו נחלק את התוצאה המתקבלת מהמכשיר בכדי לקבל את המעוות האמיתי עבור צורות החיבור השונות.

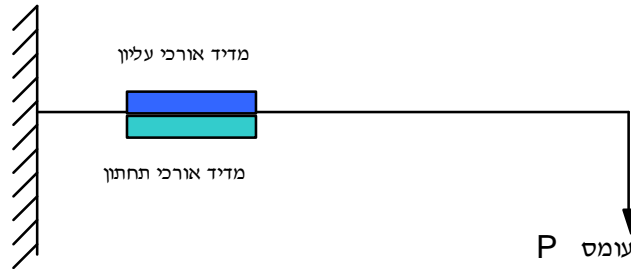
2.4.2 חצי גשר עם Dummy

Dummy הוא מדיד עיבור זהה למדיד המודבק על הקורה, אך הוא מודבק על קורה זהה בלתי מועמסת. השימוש במדיד מסוג Dummy נועד לקזז את ההשפעה של עיבור הנגרמים כתוצאה משינוי בטמפרטורה. נסמן את המעוות הנגרם כתוצאה משינוי בטמפרטורה ב- δT וב- δ את המעוות כתוצאה משאר הגורמים. נחבר בגשר וויטסטון (איור 4) את הנגד R_1 כמדיד העיבור הפעיל המודבק לקורה המועמסת, ואת הנגד R_2 נחליף במדיד עיבור לא פעיל - Dummy. כלומר, $R_1 = R_0(1 + \delta + \delta T)$ ו- $R_2 = R_0(1 + \delta T)$. הצבה של ביטויים אילו לתוך (7), כאשר $R_3 = R_4 = R_0$, תראה כי הביטוי שנקבל יהיה זהה ל (12), אך העיבור הנמדד יהיה העיבור שאינו מושפע משינוי באורך כתוצאה משינוי בטמפרטורה. כלומר, בחיבור כזה גורם הגשר הוא 1.



2.4.2 חצי גשר אורכי עליון + אורכי תחתון:

נשאיר את הנגד R_1 כמדיד עיבור אורכי המודבק על חלקה העליון של הקורה ונחבר במקום הנגד R_2 מדיד עיבור אורכי המודבק על חלקה התחתון של הקורה כמתואר באיור 6:



איור 6: קורה מועמסת עם מדיד אורכי עליון ומדיד אורכי תחתון.

כתוצאה מהפעלת העומס P נקבל מאמצי כפיפה. נניח ובנוסף לעומס P היה מופעל כוח מתיחה/לחיצה טהור על הקורה (בדומה לאיור 1). נסמן ב- δN את המעוות הנגרם כתוצאה מכוח המתיחה/לחיצה הטהור, ב- δT את המעוות הנגרם כתוצאה משינוי בטמפרטורה וב- δ את המעוות הנגרם כתוצאה מכפיפה. הביטוי עבור המדיד האורכי העליון יהיה נתון ע"י $R_1 = R_0(1 + \delta + \delta N + \delta T)$ והביטוי עבור המדיד האורכי התחתון יהיה נתון ע"י $R_2 = R_0(1 - \delta + \delta N + \delta T)$. נציב ביטויים אילו לתוך (7) כאשר $R_3 = R_4 = R_0$ ונקבל כי:

$$4 \frac{V_0}{V_i} = 2\delta \quad (13)$$

כלומר, יש לחלק את התוצאה המתקבלת מהמכשיר ב- 2, ולכן עבור חיבור כזה גורם הגשר הוא 2. יש לזכור כי בצורת חיבור זו אנו מודדים את המעוות הנגרם כתוצאה ממאמצי כפיפה בלבד.

בצורה זו ניתן לנתח כל שיטת חיבור בחיבור של "חצי גשר" או "גשר שלם" ולקבל את גורם הגשר.

3. מערכת הניסוי

1. קורת פלדה בעלת חתך מלבני, רתומה בקצה אחד. על הקורה מודבקים ארבעה מדידי עיבור: אורכי עליון ותחתון, ורוחבי עליון ותחתון.
2. סרגל למדידת שקיעת קצה הקורה (במקום ההעמסה).
3. נושא משקולות ומשקולות להעמסת הקורה.
4. מד-זחיה (קליבר) וסרגל למדידת מימדים גיאומטריים של הקורה.
5. מכשירי מדידה (K 1516, C.I.L, VISHAY & B & K, B) דיגיטליים המציגים את ערך המעוות.
6. מדיד Dummy.

4. מהלך הניסוי

ביצוע הניסוי כולל תכנון מעגלים למדידת מעוותים, כאשר בכל מעגל נמדוד את המעוות במספר עומסים בתחום 0 - 1.5 ק"ג בקפיצות של כ- 250 גרם. בכל עומס יש למדוד גם את שקיעת הקורה בנקודת ההעמסה. יש למדוד, כמובן, את הגדלים הגיאומטריים הדרושים לעיבוד התוצאות.



הקבוצה תידרש לבנות את המעגלים לצורך המדידות הבאות:

- מעוות אורכי בחיבור "חצי גשר" עם קיזוז השפעת טמפרטורה.
 - מעוות רוחבי בחיבור "חצי גשר" עם קיזוז השפעת טמפרטורה.
 - מעוות אורכי בחיבור "גשר שלם" אשר רגיש לכפיפה בלבד (דרושים קיזוזים לטמפרטורה וללחיצה/מתיחה).
- לצורך בניית המעגלים תאלץ להשתמש לפעמים במידי Dummy. לפני הפעלת המכשיר למדידת מעוותים תצטרך ללמוד את אופן הפעלתו. ההנחיות להפעלה מצויות ליד המכשיר. לפני חיבור כל מעגל, קבל את אישור המדריך ואז תוכל לבצע איפוס למכשיר ולמדוד את המעוותים בהעמסות השונות.

5. ניתוח התוצאות ודרישות הדו"ח

הערה: בניית הגרפים תעשה בשיטת הריבועים הפחותים.

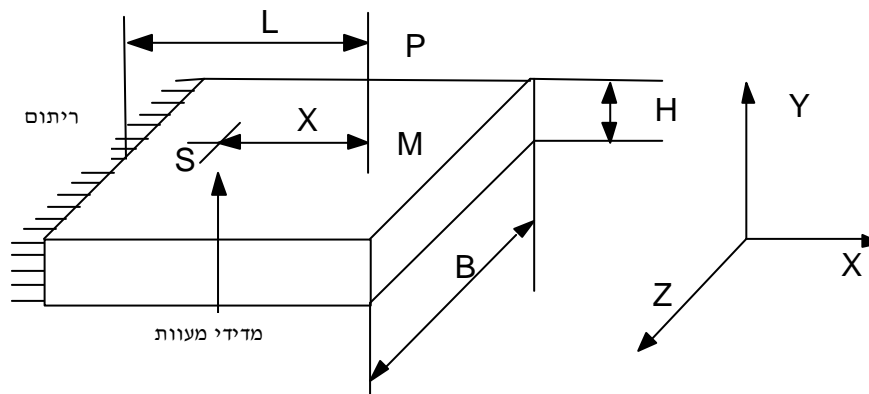
1. חשב מודות האלסטיות, E , מתוך מדידת המעוות, בעזרת גרף $\sigma = f(\epsilon)$ ובעזרת נוסחאות מתורת החוזק.
2. חשב מודול האלסטיות, E , מתוך מדידת השקיעה y בקצה הקורה בעזרת גרף $y = f(P)$ ובעזרת נוסחאות מתורת החוזק.
3. השווה בין E המתקבל בשתי שיטות המדידה ϵ - המצוי בספרות.
4. חשב את יחס פואסון ν מתוך מדידת המעוותים (בעזרת גרף) והשווה לספרות.
5. חשב המעוות במדידות שנעשו בגשר הכולל יותר ממדיד פעיל אחד וציין את הקיזוזים.
6. בכל גרף תאר את השגיאה של כל מדידה ומדידה (error bars) ולפי זה תן את השגיאה בחישוב E ו- ν .
7. כתוב את המקסנות לגבי הניסוי, התדריך, הדרישות והתוצאות.

6. הכנה לניסוי

לניסוי יש להופיע כשבדיך סכמות חיבורים לכל המעגלים האפשריים (כנדרש בסעיף ד: מהלך הניסוי). כמו כן, עליך להיות מצויד בכל הידע הדרוש לניתוח התוצאות, כולל נוסחאות מתורת החוזק. אין צורך לדעת פיתוח הנוסחאות הללו, אך דרושה ידיעת תוכנן (ראה שאלון הכנה בהמשך). אינך צריך להכיר את אופן פעולת המכשיר למדידת מעוותים לפני הגיעך לניסוי. זאת תלמד במעבדה - ע"פ ההנחיות המצויות על המכשיר.

6.1 שאלות הכנה:

בניסוי נתונה קורת פלדה בעלת חתך מלבני, הרתומה בקצה אחד וחפשית בקצה השני. מימדי הקורה נתונים. הכוח P אנכי ופועל בנקודה M . מדידי המעוות מודבקים בנקודה S .



איור 7: סכימת מערכת הניסוי.



פתח ביטויים אנליטיים לחישוב הגורמים הבאים:

1. מומנט האינרציה I_{zz} של הקורה.
2. השקיעה בנקודה M כתלות בכוח P .
3. מודול האלסטיות של החומר כתלות בשקיעה ובכוח בנקודה M .
4. המומנט בנקודה S כתלות בכוח P .
5. המאמץ σ_x בסיב העליון/תחתון של הקורה בנקודה S כתלות בכוח P .
6. המעוות ϵ_x בסיב העליון/תחתון של הקורה בנקודה S כתלות בכוח P .
7. המעוות ϵ_z בסיב העליון/תחתון של הקורה בנקודה S כתלות בכוח P .
8. מודול האלסטיות של החומר כתלות במעוות ϵ_x בנקודה S ובכוח P .
9. מודול האלסטיות של החומר כתלות במעוות ϵ_z בנקודה S , בכוח P ובידיעת יחס פואסון.
10. חישוב יחס פואסון של החומר כתלות במעוות ϵ_z בנקודה S , בכוח P ובידיעת מודול האלסטיות.
11. חישוב יחס פואסון של החומר כתלות במעוות ϵ_x ו- ϵ_z בנקודה S .
12. מהו היחס בין V_0 לבין V_i (V_0/V_i) אם נתון שבנקודה S מונח מדיד אורכי עליון, והשפעות הטמפרטורה מקוזזות בעזרת מדיד אורכי תחתון באותה הנקודה? המעוות שנמדד בנקודה S בחצי גשר כתוצאה משני המדידים הוא $200\mu s$ והוא $GF = 2.05$.
13. מהו הגורם המקסימלי שניתן לקבל מקשר שלם, כאשר במערכת ישנם שני מדידים אורכיים (עליון ותחתון) ושני מדידים רוחביים (עליות ותחתון)? הראה היכן יחוברו המדידים בגשר הנ"ל כדי שיהיה גורם גשר מקסימלי.
14. כיצד ישפיע שינוי בטמפרטורה על הניסוי - של מדיד העיבור? של ה - Dummy? של הסביבה?



תמונה 1: מערכת הניסוי.