

חישוב מסיכות להבטחת אחידות עובי הציפוי  
על דגמים מישוריים באמצעות ניתוז מגנטרוני

אורי ארמון, אריה ברקר, בנימין יהב, שמואל לביא

טבת תשנ"א - ינואר 1991

English title and abstract included



#### LEGAL NOTICE

This publication is issued by the Nuclear Research Centre - Negev, Israel Atomic Energy Commission. Neither the Nuclear Research Centre - Negev, nor its contractors, nor any person acting on their behalf or on behalf of the Israel Atomic Energy Commission

make any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this publication, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication will not infringe upon privately owned rights, or

assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication.

Mention of commercial products, their manufacturers, or their suppliers in this publication does not imply or connote approval or disapproval of the products by the Nuclear Research Centre - Negev or by the Israel Atomic Energy Commission.

#### הודעה משפטית

פרסום זה מתא לאור על ידי קריה למחקר גרעיני - נב, התעדה לאנרגיה אטומית של ישראל. קריה למחקר גרעיני - נב והפעלים מטעמה או בשמה, או מטעם התעדה לאנרגיה אטומית של ישראל או בשמה

אינם אחראים או ערבים, אחריות או ערבות כלשהי, במפורש או שלא במפורש, לדיוק, לשלמות ולשימוש של המידע הכלול בפרסום זה או לכך שהשימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הנוון בפרסום זה לא יפגע באכוות פרטיות של אחרים,

ואינם מקבלים על עצמם כל התחייבות בנין הדין שימוש או נזקי השימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הנוון בפרסום זה.

הציון של מוצרים מסחריים, של יצרניהם או של ספקיהם בפרסום זה אין משמעו אישור המוצרים על ידי קריה למחקר גרעיני - נב או על ידי התעדה לאנרגיה אטומית של ישראל.

This publication and more information about its subject matter may be obtained at the following address:

Scientific and Technical Information Department  
Nuclear Research Centre - Negev  
P. O. Box 9007  
84 190 Beer-Sheva, ISRAEL

ניתן להשיג את הפרסום הזה וכן מידע נוסף בנושא הפרסום על ידי מניח לכתובת:

יחידת המידע  
קריה למחקר גרעיני - נב (קמ"ט)  
ת"ד 9007  
באר שבע 84 190

## חישוב מסיכות להבטחת אחידות עובי הציפוי על דגמים מישוריים באמצעות ניתוז מגנטרוני

אורי ארמון, אריה ברקו, בנימין ירב, שמואל לביא

טבת חשנ"א - ינואר 1991

### תקציר

התפלגות ענן האדים המתקבל מתותח ניתוז אינה אחידה בחלל תא הוואקום של מערכת הניתוז. את שיטת השטף, הרוש ליצירת ציפויים אחידים בדרגת אפיצות רצויה, ניתן להשיג בעזרת מסיכות החותכות את ענן האדים, בעזרת משטר תנועה מבוקר של המצעים בתוך ענן האדים, או בשילוב של שתי הדרכים. עבודה זאת מתארת את דרך החישוב של המסיכות המיועדות לדגמים מישוריים, זאת יישומה למקרה של תותח ניתוז מסוג S-Gun מתוצרת Varian. השימוש במסיכה הקטין את פיזור העובי על-פני דגמים טבעתיים גדולים ברוחב של 200 mm מ-35%± ל-9%± סביב ערכו הממוצע של העובי.

DESIGN OF MASKS TO OBTAIN COATING UNIFORMITY ON PLANAR  
SUBSTRATES BY MAGNETRON SPUTTERING

Uri ADMON, Arie BERKO, Benjamin YAHAV, Shmuel LAVI

January 1991

**ABSTRACT**

The vapor cloud produced by a magnetron sputtering gun in the vacuum chamber is not uniform. In order to coat substrates within a desired tolerance of thickness uniformity, a "flattening" of the vapor flux distribution is required. This is achieved by means of mechanical masks which intercept the vapor cloud, by a carefully designed motion of the substrates through the vapor cloud, or by a combination of both. The present work describes a design method for masks, to be used with planar substrates, and its application in the case of a Varian "S-Gun" magnetron sputtering gun. By using the mask the coating thickness uniformity on large ring-shaped flat substrates, 200 mm wide, has been improved from  $\pm 35\%$  to  $\pm 9\%$  around the mean value of the thickness.

עמודתוכן העניינים

1	מבוא	1
2	גיאומטריית המערכת ושיטת המיפוי של ענן האדיח	2
3	מדידת VDF במישור אופקי מעל תוחח הניתוח S-Gun	3
9	חישוב המסיכה	4
14	רוגמה מעשית לדרך החישוב	5
21	תוצאות ומסקנות	6
22	סימוכין	
23	נספח 1	

1 מבוא

התפלגות ענן האדים המתקבל מתחת ניתוז אינה אחידה בחלל תא הוואקום של מערכת הניתוז. היות ובהליכי ייצור תעשייתיים השאיפה היא לטעון במתקן הציפוי מספר מקסימלי של רגמים בבת אחת, יש לראוג להבטחת אחידות עובי הציפוי על-פני שטח גרול ככל האפשר. קיימות שתי דרכים עיקריות להשגת מטרה זאת: שימוש במסכות המגבילות את ענן האדים ומשנות את התפלגותו כך שבשילוב עם הנעת הרגמים דרכו, יתקבל ציפוי אחיד, או לחילופין, שימוש במתקני הנעה מתוחכמים אשר התנועה שהם מעניקים לרגמים היה כרי לשטח את שטף הקרינה האינטגרלי הפוגע בהם.

בספרות (סימוכין 1\*5) פורסמו עבודות אחרות המחשבות את פונקציית ההתפלגות של ענן האדים, (Vapour Distribution Function). חסרונן המשותף של שיטות החישוב הוא שהן יוצאות מהנחות יסוד אמפריות בדבר ה-VDF של מקור נקודתי, וממשיכות באינטגרציה על כל שטח המקור. ההנחה המקובלת היא חוק ה-cosine, הקובע כי אלמנט שטח  $ds$  של המקור (המטרה) תזום לשטף הקרינה במרחק  $\vec{r}$  ממנו תרומה הפרופורציונית לגודל השטח של המקור שרואה נקודת הרגם, כלומר  $ds \cdot \cos(\vec{ds}, \vec{r})$ . המשך החישוב הוא אינטגרלי על כל שטח המקור ומביא בחשבון את גיאומטריית הרגמים ואופן תנועתם. אף-על-פי שהחישובים מניבים תוצאות טובות למדי בדרך כלל, דרגת הסיבוך בהם גבוהה, ורמת הריוק מוגבלת מלכתחילה. הגורמים המקשים על החישוב הם:

- חוק ה-cosine הוא חוק אמפירי מקורב;

- פרופיל המטרה הולך ונסוג עם דרגת הניצול של המטרה אולם לא באופן אחיד. כתוצאה

מכך נתוני היסוד של האינטגרציה אינם קבועים. איכול המטרה אינו אחיד, כלומר

אלמנטי שטח שונים על-פניה הם בעלי תרומות שונות לענן האדים. ההתפלגות תלויה

בפרופיל המטרה בכל זמן וזמן, ולפיכך מישחנה עם דרגת הניצול של המטרה.

- בגלל לחץ העבודה הגבוה סובל ענן האדים מפזזור בראוני ניכר חוך שינוי משמעותי

ב-VDF. מירת הפזזור תלויה בלחץ העבודה, שאיננו אחיד בחלל תא הוואקום.

- קירות תא ושאר אביזרי הריהוט הפנימי שבו, וכן נושא הרגמים והרגמים עצמם גורמים

לשינויים מקומיים בענן האדים, בהיותם sink בדרגה זו או אחרת של יעילות לאטומים

הפוגעים בהם.

מסיבות אלו, הדרך הפשוטה והאמינה לקביעת ה-VDF בתנאי ניתוז מסוימים היא הדרך האמפירית. הרו"ח הנוכחי מפרט את חישוב המסיכה להבטחת אחידות הנידוף, בהסתמך על

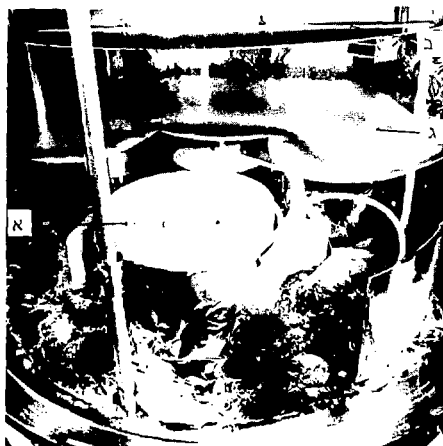
עוני VDF הנמדדים באופן ניסויי במקרה של רגם מישורי, ומציג את תוצאותיו.

## 2 גיאומטריית המערכת ושיטת המיפוי של ענן האדים

ציור 1 מציג את מכנה תא הנידוף לגביו נערכו החישובים ובו בוצעו הניסויים. בתא מותקנים בו שני תוחחי ניתוז הפונים בלפי מעלה. מעל התוחחים נמצאת הקרוסלה אליה רתום נושא הדגמים. הנושא הוא דיסקת אלומיניום בעובי 2 mm ובקוטר כ-700 mm, התצויה באמצעה כדי להקל את פירוקה. המרחק האנכי בין הדגמים והתוחח ניתן לשינוי. מרחק זה נקבע בהתחשב בגיאומטריית הדגמים המיועדים לציפוי, באחידות הנודשת של העובי ובקצב הרצוי של הציפוי. יש לזכור, שככל שמרחקים מן התוחח יורד שטף האטומים, פוחתת אנרגיתם כתוצאה מפיזורים אי-אלסטיים וגדלה מידת פיזורם הרוחבית.

עם זאת, משתפרת האחידות, כתוצאה משיטות שטף האטומים ומיתון ירידתו כתלות במרחק מהמרכז. המרחק המיזערי האפשרי בין התוחח והדגמים הוא כ-50 mm. מתחת לערך זה יחדרו הדגמים לענן הפלסמה ויקטינו את יעילות הציפוי.

בניסויי המיפוי שנערכו השתמשנו בדיסקיות מפל"ם בקוטר 25 mm, שנקבעו במרחקים שונים על פני נושא דגמים שטוח, שהוצב מעל התוחח בגבהים מגוונים. לאחר הניתוז נקבע משקל המחכת (אלומיניום) שהצטברה על כל דיסקית ודיסקית באנליזה כימית רטובה. הערכים שהחקבלו לגבי תוחח הניתוז S-Gun מתוצרת Varian עוברו, והם מוצגים בסעיפים הבאים.

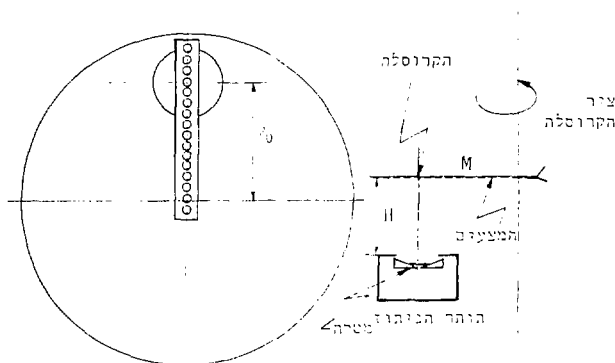


ציור 1 תא הניתוז:

- (א) תוחחי הניתוז;
- (ב) הקרוסלה;
- (ג) המסיכה.

### 3 מדידת VDF במישור אופקי מעל לתוחם הניתוז S-Gun

מעל התוחם הוצב סרגל אופקי, עליו חוברו זו לזו דיסקיות מפלב"ם (ציור 2). מרכז הסרגל מעל התוחם נעשה באמצעות אנך שהורד אל מרכזו. גובה הדיסקיות מעל למרכז התוחם, H, היה 200 mm. הגובה נבחר כפשרה בין הדרישה לקצב ציפוי גבוה, לבין הדרישה להבטחת אחידות הציפוי על כל שטח המצעים.



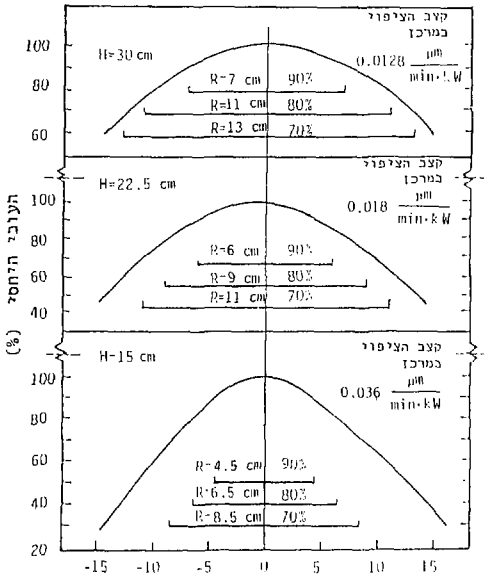
ציור 2 גיאומטריית המערכת.  $R_0$  הוא מרחק מרכזו של תוחם הניתוז, M, מציר הקרוסלה.

העקומות בציורים 3 ו-4 נתקבלו על-פי תוצאות ניסויי הכיול המוקדמים ומראות את אחידות הציפוי בתלות בגובה המצעים מעל למרכז התוחם. אנו רואים כי בגובה 225 mm מעל התוחם יורר עובי הציפוי ל-90% מעוביו במרכז ברדיוס 60 mm; ל-80% ברדיוס 90 mm; ול-70% ברדיוס 110 mm. אי-אחידות כזו אינה קבילה בדרך-כלל במרבית סוגי הציפויים. העקומה שבציור 5 מציגה את התוצאות שהתקבלו בניסויי המיפוי, בגובה 200 mm מעל התוחם. הערכים נודמלו לעובי 100% מעל מרכז התוחם. קצב הניתוז הממשי שהתקבל בתנאים אלה היה:

$$290 \frac{\text{\AA}}{\text{kw}\cdot\text{min}}, \text{ עבור לחץ ארגון של } 3 \times 10^{-3} \text{ mbar}$$

טבלה 1 מסכמת את אופייני התוחם S-Gun כפי שהתקבלו בניסויי הכיול המוקדמים.

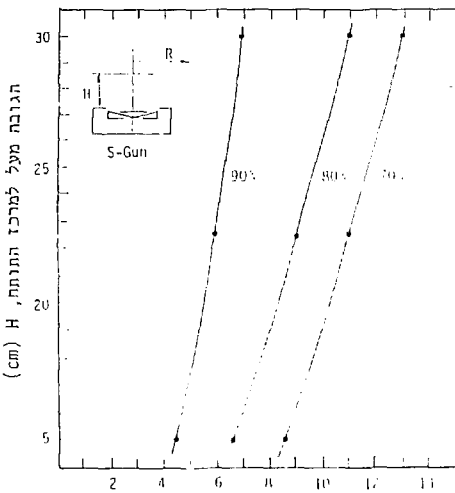




המרחק ממרכז התותח, R (cm)

ציור 3

התפלגות עובי  
הציפוי המחבל  
על מצעים הצמודים  
לקרוסלה כתלות  
במרחק האופקי, R,  
מציר התותח.



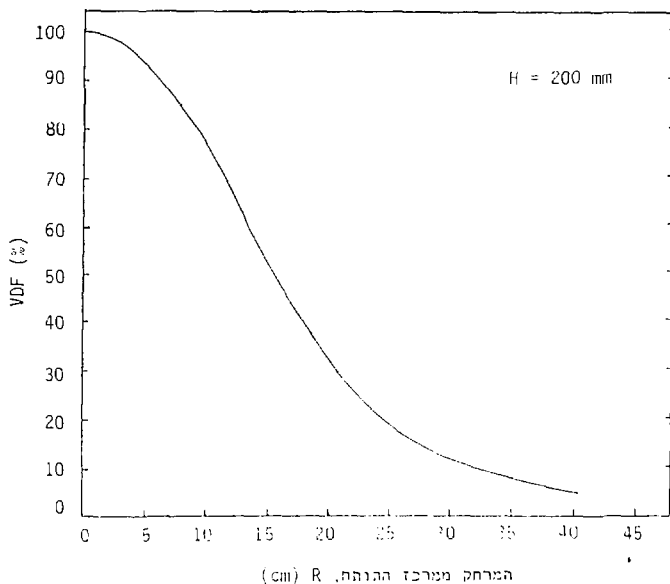
המרחק ממרכז התותח, R (cm)

ציור 4

קווים המראים את  
ירידת עובי הציפוי,  
(גבולות האחידות)  
כתלות במרחק מציר  
התותח, בגבהים  
שונים מעליו.

טבלה 1 קצב הציפוי על דגם סטטי אופקי ממטרת אלומיניום בלחץ ניתוז של  $3 \times 10^{-3}$  mbar וגבולות האחידות המתקבלים בגבהים שונים מעל למרכז התוחה. גבולות האחידות מציינים את המרחק מהמרכז במישור הרגם, בהם קצב הציפוי הוא אחוז נקוב מהקצב במרכז. הטבלה מתייחסת לתוחה S-Gun מתוצרת Varian.

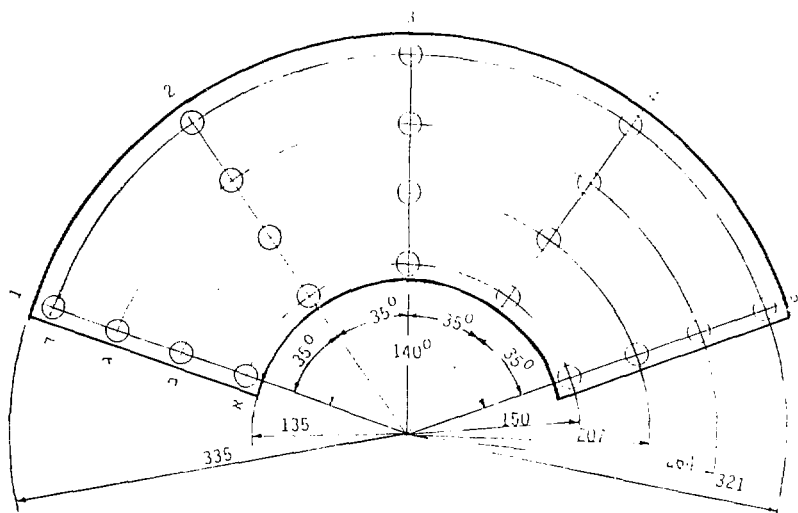
גבולות האחידות בניתוז סטטי, ביחס ל-100% מעל למרכז התוחה (mm)			קצב ציפוי סטטי ממטרת אלומיניום, מעל מרכז התוחה $\text{\AA}/(\text{kw}\cdot\text{min})$	הגובה מעל למרכז התוחה (mm)
90%	80%	70%		
45	65	85	360	150
55	83	103	290	200
60	90	110	180	225
70	110	130	130	300



ציון 5 הפילוג הרריאלי של עובי הציפוי ממטרת האלומיניום, בגובה 200 mm מעל התוחה. הלחץ בתא הוא:  $3 \times 10^{-3}$  mbar, קצב הניתוז המקורב מעל מרכז התוחה הוא:  $\frac{\text{\AA}}{\text{kw}\cdot\text{min}}$  .290

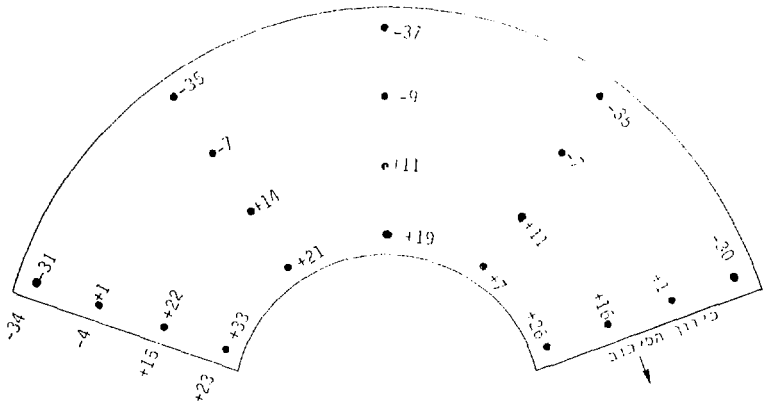
התפלגות זו של עובי הציפוי משמשת בסיס לחישוב המסיכה להלן.

ציור 6 מראה נושא דגמים בצורת חלק של דיסקה, ('בננה') שעל כל שטחה יש להבטיח ציפוי אחיד באפיצות מוגדרת (למשל  $\pm 10\%$ ). ה'בננה' ימורה לקרוסלה בגובה נתון, וסובבת יחד איתה מעל התומח בתדירות של כ-11 סיבובים לרקה. מיפוי עובי הציפוי בתנאים דינמיים, כלומר תוך כדי תנועת הקרוסלה, נעשה בעזרת דיסקיות מפל"ם במקומות המסומנים, (ציור 6) במחזור לעיל.



ציור 6 נושא הדגמים ('בננה') - מידות וזוויות. המיפוי בוצע במקומות המסומנים, המרחקים מצויינים ב-mm.

התוצאות שהתקבלו במיפוי דינמי ללא מסיכה מוצגות בציור 7. אי-האחידות בגזרות מגיעה לשיעור גבוה למדי ( $\pm 35\%$ ) החורג בהרבה מהאפיונות המותרת ( $\pm 10\%$ ). אי-האחידות הרדיאלית נובעת הן בגלל צורת ה-VDF של התוחח והן בגלל סיבוב ה'בננה'. ככל שהרדיוס יותר גדול מתחלקת כמות החומר המנותז על אורך מעגל יותר גדול ועובי הציפוי קטן באופן פרופורציוני. אם נוסיף לכך את ירידת ה-VDF כאשר מתרחקים ממרכז התוחח, ואת השפעות השוליים והקירות, נוכל להבין את ההישגנות הרדיאלית של העובי. אי-האחידות האזימוטלית בגזרות השונות נובעת מחוסר אחידות במהירות הסיבוב ההיקפית של הדגם, כתוצאה מכיוון לקוי של תמסורת הכוח בין המנוע והקרוסלה.



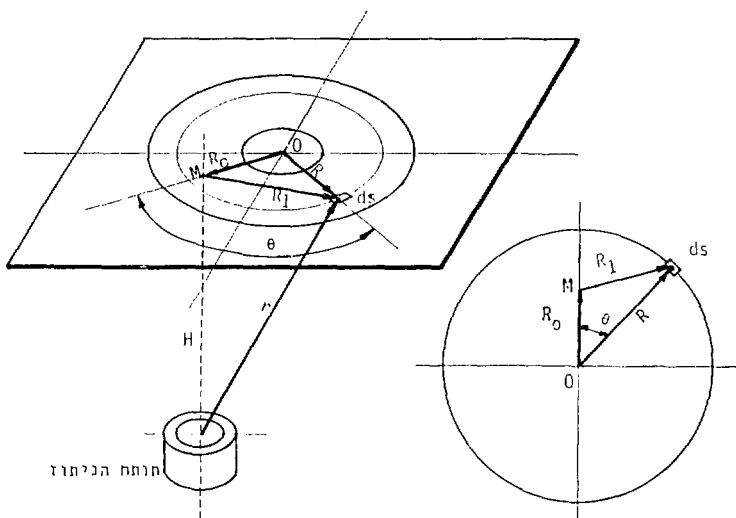
ציור 7 פילוג עובי הציפוי בניתוז דינמי ממסרת אלומיניום, ללא שימוש במסיכה. המספרים מציינים את הסטייה באחוזים מן העובי הממוצע. אי-האחידות מגיעה לשיעור של  $\pm 35\%$ . המספרים שבכד שמאל הם הממוצעים בכל שורה ושורה.  $R_0 = 236 \text{ mm}$ ,  $P = 4 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ,  $H = 200 \text{ mm}$ .

בניסויים הראשונים ניתן היה להבחין בתופעה מעניינת; עובי הציפוי עלה במידה ניכרת כלפי שולי ה'בננה'. ההסבר לתופעה נעוץ בכך שצפיפות ענן האדים יותר גדולה בסמוך לשולי ה'בננה' מאשר באיזוריה הפנימיים. מיטחי מתכת מרוששים את ענן האדים בסביבתם הקרובה בהיותם בולע אידיאלי בקירוב, לכל אטום הפוגע בהם. הסכיבה המיירית של שולי ה'בננה', בקונפיגורציה הנ"סוי, היחה גזיחה. הגז פועל כרפלקטור ומחזיר חלק מאטומי המתכת כלעומת שבאו. אלה מצטרפים לענן, ואחרי פיזורים בראוניים נוספים משנים את כיוונם ועשויים לשקוע על הדגם. יש לציין, כי האטומים הניתזים נעים בתא הוואקים במהירויות של אלפי מטר לשניה, ועל-כן מנקודת ראותם הדגמים לציפוי נמצאים למעשה במצב סטטי.

כרי להתגבר על תופעות השוליים נבנה נושא הדגמים מחדש יקיבל את צורתו הנוכחית. הרגמים מוצמדים למשטח רציף הבולט אל מעבר לגבולם, כך שבעיית השוליים, באם היא נוצרת, נדחקת לאזורים שהם מחוץ לדגם עצמו.

## 4 חישוב המסיכה

גיאומטריית המערכת מוצגת בציור 8.



ציור 8 גיאומטריית המערכת.

נתבונן באלמנט שטח  $ds$  על הרגם, ברדיוס  $R$  מרכז הסיבוב,  $O$ , של הקרוסלה.

$$ds = R \cdot dR \cdot d\theta$$

במערכת צירים גלילית:

$\theta$  היא הזווית האיזוטלית.

קיים:

$$R_1^2 = R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos\theta \quad [1]$$

$R_1$  הוא מרחקו של האלמנט  $ds$  מנקודת החיתוך  $M$  של ציר התוחה עם מישור הדגמים.

נניח כי צפיפות זרם האטומים הפוגעים כרגם בקונפיגורציה הנתונה היא  $J(R, \theta)$ , ויחידותיה  $\text{atoms/cm}^2 \cdot \text{sec}$ .

מספר האטומים  $dN$ , המצטבר במשך זמן  $dt$  על אלמנט השטח  $ds$  הוא:

$$dN = \epsilon J(R, \theta) ds dt$$

$\epsilon$  הוא מקדם ההידבקות (sticking coefficient) של המימסה.  
בהנחה  $\epsilon = 1$  יהיה:

$$dN = J(R, \theta) ds \cdot dt$$

עובי הביטוי המתקבל הוא:

$$dx = \frac{dn}{\rho} ds = \frac{A}{\rho N_0} dN$$

כאשר:

$A$  - המשוך האטומי;

$N_0$  - מספר אבוגדרו;

$\rho$  - צפיפות החומר השוקע;

$dn$  - מסת החומר השוקע;

לכן:

$$\frac{dx(R, \theta)}{x(R, \theta)} = \frac{dx(R, \theta)}{dt} = kJ(R, \theta) \quad [2]$$

$k$  נקראת קבוע היצירה:

$$k = \frac{A}{\rho N_0}$$

כאמור, המימסה המצטברת על ידי  $J(R, \theta)$ , המצטברת באטומים הימית ביחידות של  $gr/cm^2$ , תוך פתיחת היציאה [1] המצטברת על ידי  $R_1$  היכן  $R$  - אס' נחלק את הערכים המדורים למשך זמן  $dt$  יתקבל, כפי שציינו,  $J(R, \theta)$  המצטברת על ידי  $gr/(cm^2 \cdot sec)$ .

הביטוי [2]  $\frac{dx(R, \theta)}{x(R, \theta)} = kJ(R, \theta) dt$  יתקבל, בהנחה  $k$  - במיקרה של ניתוח דינמי, עלינו לייחס ויחידה אחת של זמן יציבה, וזאת העובדה שנקודה מסוימת על הדיסק תחלף בתדירות מסוימת. אנו יושבים על העקרון, בהם  $J(R, \theta)$  אינו אחיד, קצר צינור יציב,  $h$ , מיוצרת יחסית עובי האטומים המתקבל בכל נקודה ונקודה כאשר המסת היציב של הדיסק, הוא:

$$h(R) = \frac{k}{2\pi R} \int_0^{2\pi} J(R, \theta) R d\theta$$

ביחסות ביצוע נכון, ישנן שתי נקודות יחס (ימנחה נדרוס  $R$  מהמכו) ושתי נקודות  $J(R, \theta)$  יתקבלו בין הנקודות  $(R, \theta)$  -  $(R, \theta + d\theta)$  נמשך מוק הזמן היותו  $(1, 2\pi R)Rd\theta$ . ליתרון יש משקל את החומה  $J(R, \theta)$ . ביחס שבין פרק זמן זה לבין הזמן הנדרש ליציב יציב שלם.

לכן :

$$\dot{h}(R) = \frac{k}{2\pi R} \int_0^{2\pi} J(R, \theta) d\theta \quad [3]$$

אם בין התוחם והגם מצויה מסיכה, החוסמת את ענן האדים בזוויות הגדולות מהזוויות הנמוכות בפונקציה  $\alpha = \alpha(R)$ , נקבל:

$$\dot{h}(R) = \frac{k}{2\pi R} \int_{-\alpha(R)}^{\alpha(R)} J(R, \theta) d\theta = \frac{k}{\pi} \int_0^{\alpha(R)} J(R, \theta) d\theta \quad [4]$$

כדי לחשב את המסיכה עלינו לקבוע, איפוא, את הפונקציה  $\alpha = \alpha(R)$ , שתתן את קצב גידול העובי הרצוי,  $\dot{h}(R)$ .

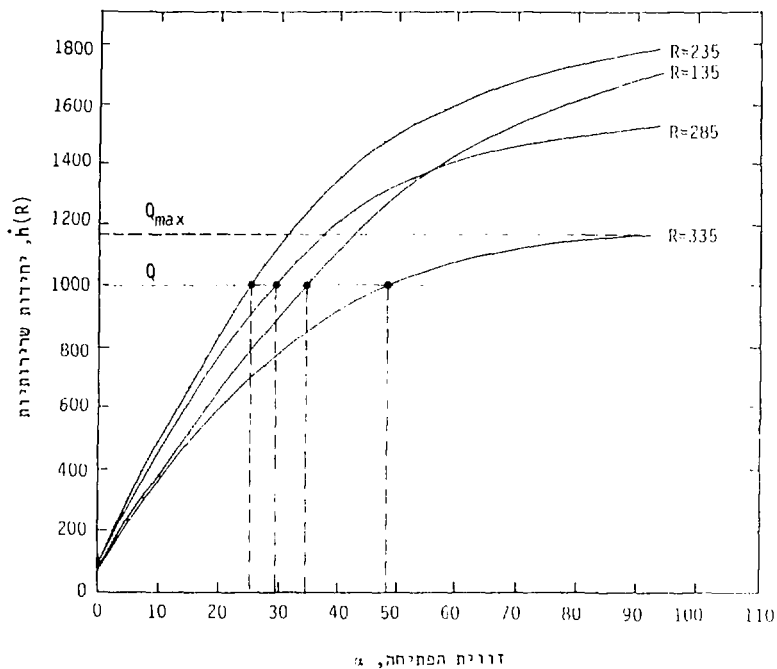
שיטת החישוב היא כולקטן: תחילה נבצע את האינטגרציה [4] ללא מסיכה, ונקבל  $\dot{h}_{\max}(R)$  בתחום  $Y_1 \leq R \leq Y_2$ , וזאת על-פי הערכים המרורים של  $J(R, \theta)$ . כגבול האינטגרציה העליון נבחר  $Y_2$  המיוחס למסיכה  $\alpha_m$  הגדולה ביותר מכל ערכי  $\alpha(R)$  העשויים להיות שימושיים. עתה נבחר ערך  $\alpha$  אחר, נשקל את  $\dot{h}_{\max}(R)$  שהתקבל בתחום  $Y_1 \leq R \leq Y_2$ , ונחשב לכל  $R$  את זוויות המסיכה  $\alpha(R)$  המתאימה לערך אינטגרציה זה. (ראה ציור 9):

$$Q = \frac{k}{\pi} \int_0^{\alpha(R)} J(R, \theta) d\theta \quad [5]$$

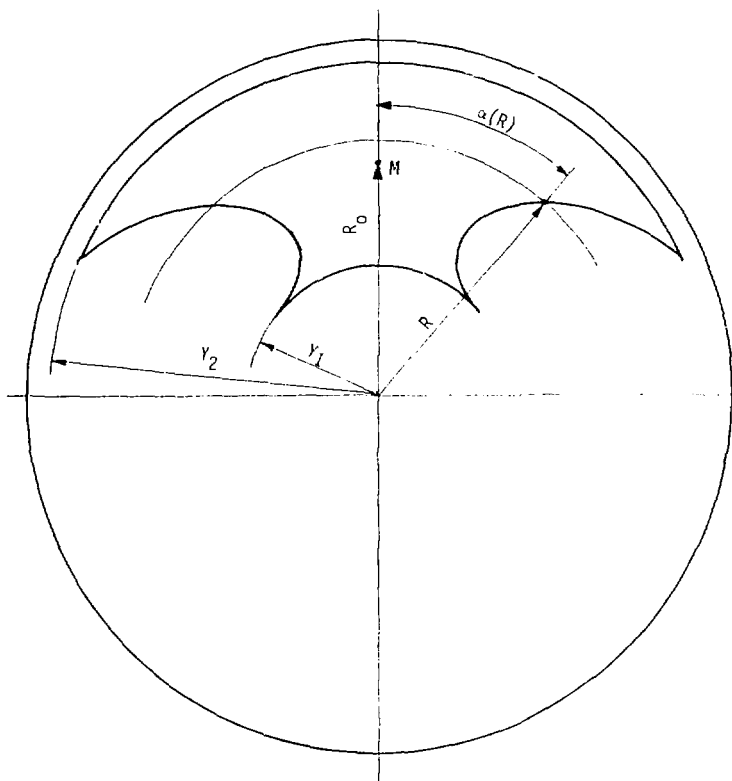
בנות העיסוק תורה שימושית וחשובה על-ידי הקטנות ברדיוסים  $Y_1$  ו- $Y_2$  ובצורה על-ידי העקומות  $\alpha = \alpha(R)$  (ציור 10). מובן, שגודל גאומטרי מיוחד במיקומם של התוחם  $(R_0)$ , ובגובה ובצורת מעיל התוחם  $(H)$ ,

תורמים להשגת מוצקות בעיסוק 1.





צורה 9 קצב הגידול של עובי הציפוי ( $h$ ) כפונקציה של זווית הפתיחה ( $R$ ) כמלות בזווית הפתיחה ( $\alpha$ ) על המסיכה. במרחק ערך האינטגרציה  $Q$  ( $Q \leq Q_{max}$ ) מאפשרת את קביעת  $\alpha = \alpha(R)$ . העקומה העליונה ביותר היא עבור  $R = R_0$ , או בקירובו בהתאם לצורת ה-VDF. במקרה שלפנינו  $Y_1 = 135$  ו- $Y_2 = 335$ .



צור 10 תיאור סכימתי של המסיכה.

5 דוגמה מעשית לדרך החישוב

בדוגמה שלפנינו נחשב את המסיכה למיקרה מעשי בו נדרש ציפוי אלומיניום בעובי אחיד, כאפיוצות  $\pm 10\%$ , על רגמים החסומים בגיזרה טבעית ('בננה') שזווית פתיחה כ-140°, והיא תחומה בין הרדיוסים  $Y_1 = 135 \text{ mm}$  ו-  $Y_2 = 335 \text{ mm}$ . התוכנית כנספה 1 מבצעת את החישוב. האינטגרציה נעשית באופן נומרי כסכום של סדר בצפיפות רצויה של נקודות, תוך שימוש באינטרפולציה ליניארית בין הנקודות לגביהן קיימים ערכים מדויקים.

נתוני הקלט הם:

H - גובה מישור הרגמים מעל התוחה (כידועה בלבד);

$R_0$  - מרחקו של מרכז התוחה, M, מציד הסיבוב של הקרוסלה 0 (ציר 8);

$Y_1, Y_2$  - הגבולות הרדיאליים של המסיכה החורגים לפחות ב-10 mm מגבולות הרגם (ציר 10);

Z - מספר ערכי R ( $Y_1 \leq R \leq Y_2$ ) שלוביים תחושב  $\alpha(R)$  בצעדים שווים;

$h(R_1)$  - ערכי VDF, כלומר מצב גידול עיבי הציפוי ביחידות כלשהן, למשל: אחוזים מהמצב המתקבל מעל מרכז התוחה,  $h(0)$  כחלות במרחק  $R_1$  ממרכז התוחה, במישור הרגמים. ערכים אלה, שהם תוצאות הכיול הסטטי המוקדם, מוזנים בחחילת התוכנית כנוקטור בעל  $N_1$  מרדיבים.

$T_1$  - הפגיעה בזווית האינטגרציה ( $4\theta(\text{deg})$ ), [5], המתושבת באופן נומרי כסכום של סדר.

דו-השוית עם המחשב מתגדל כדלקמן:

```

♦FFH10
S111
H=100.000000 10.000000 135.000000 335.000000 140.000000
R=10.000000
Z=10
N1=10
T1=10.000000 10.000000 10.000000 10.000000 10.000000
VDF=1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
R1=10.000000

```

האתר הנתון ימוג ש' אתו יוצגות המבנה המצא, והצמיח את קצב גידול העיבי באותן יחידות נריומיות כמו ה'ין  $h(R_1)$ . הערכים שבטבלת הנידחים החלקים ניתני דינגמי ללא שימוש במסיכה. במרחקים ממרכז התוחה, החורגים מתחום הגידול נקבע כי  $VDF = 0$ . התוכנית מניחה אינטרפולציה ליניארית בין הנקודות לגביהן יש ערכי VDF מדויקים.

עתה מודפסת טבלת ערכי Q:

RATE INTEGRAL AS FUNCTION OF HALF HALF ANGLE AT R= 105 MM.

77.4498	154.735	231.529	307.514	382.888
455.867	527.752	597.916	666.163	732.322
796.24	857.785	916.843	973.315	1027.12
1078.33	1127.03	1173.37	1217.42	1259.13
1298.67	1326.44	1371.95	1404.21	1431.03
1465.75	1473.72	1519.95	1544.46	1561.26
1588.37	1608.06	1626.42	1644.32	1661.51
1677.34	1698.15	1706.45	1729.17	1733.15
1745.58	1757.77	1764.7	1781.19	1782.25
1802.9	1813.14	1823.07	1822.21	1843.37

ANOTHER R=105 PROCEED TO NEXT R=20 OF TOP R=105  
 CHOOSE R= RADII FROM CALCULATE CENTER, NR=125

PRINT RATE INTEGRAL (1) OF PROCEED TO NEXT R=20

RATE INTEGRAL AS FUNCTION OF HALF HALF ANGLE AT R= 5 MM.

100	145.367	298.111	461.708	441.287
584.066	671.825	760.111	845.165	425.494
1002.43	1077.95	1140.54	1202.11	1258.79
1310.66	1358.22	1401.79	1441.17	1472.96
1511.24	1542.11	1570.07	1595.11	1617.46
1637.37	1652.56	1672.25	1687.22	1701.76
1714.77	1707.01	1722.25	1734.11	1752.13
1769.6	1737.11	1737.22	1737.22	1761.01
1809.47	1816.61	1822.31	1822.31	1842.64
1829.25	1840.11	1840.11	1840.11	1840.11

ANOTHER R=105 PROCEED TO NEXT R=20 OF TOP R=105

CHOOSE R= RADII FROM CALCULATE CENTER, NR=125

PRINT RATE INTEGRAL (1) OF PROCEED TO NEXT R=20

RATE INTEGRAL AS FUNCTION OF HALF HALF ANGLE AT R= 5 MM.

78.2998	154.737	231.529	307.514	382.454
444.757	515.612	572.712	625.222	672.101
733.700	794.171	851.761	907.117	961.117
969.29	1071.246	1127.461	1182.11	1235.27
1241.72	1256.23	1271.11	1277.11	1282
1107.15	1117.14	1127.11	1137.11	1147.12
1151.29	1156.101	1164.11	1172.11	1174.15
1174.15	1174.15	1174.15	1174.15	1174.15
1174.15	1174.15	1174.15	1174.15	1174.15
1174.15	1174.15	1174.15	1174.15	1174.15

ANOTHER R=105 PROCEED TO NEXT R=20 OF TOP R=105

מתוך הטבלות יש לבחור ערך Q, הפחות ציפוני למעשה לעובי הציפוי שיתקבל בתנאים דינמיים, תוך שימוש במסכה במשך זמן ציפוי נתון. רצוי שאורך זה יהיה גדול ככל האפשר, אך עדיין קטן מהערך המרבי שבטבלה, כך שהמסכה אכן תהיה ברת תועלת ותאפשר מידה מסוימת של גמישות בהתאמתה הסופית. בדוגמה שלפנינו נבחר בערך Q=1030, ועליו אנו מכריזים בתשובה לשאלת המחשב (שורה 830).

בשלב זה עוברת התכנית לחישוב גבולות המסיכה. לכל Z הערכים של  $R_i$

(בתחום  $Y_1 \leq R_i \leq Y_2$ , בצעדים שווים  $\Delta R = \frac{Y_2 - Y_1}{Z - 1}$ ), מחושב המיפתח הזוויתי  $\alpha(R_i)$  של

המסיכה, אשר יתן קצב גידול עובי Q. במלים אחרות, צורת המסיכה המחושבת אמורה

להבטיח ציפוי אחיד על-פני כל שטח המצעים בתחום שבין הרדיוסים  $Y_1$  ו- $Y_2$ . פלט התוכנית

הוא כלהלן:

MAKING CALCULATION: GIVEN: RECTOF. ANGLE: 90.00 DEG. P.D.F. R.P. = 200. MM.

H = 200. MM

CHOOSE VALUE OF RATE INTEGRAL (C = R / 1000)

CHOOSE R LIMITS: FROM (MM) = 125 TO (MM) = 145 NO. OF STEPS = 20

NO.	RADIUS MM	MAKING HALF ANGLE, DEG.	STRING (MM CENTER TO MAKING)	RATE INTEGRAL
0	125	38.0685	81.5742	1.000
1	127	38.0167	81.2702	1.000
2	129	38.0685	81.7358	1.000
3	131	38.0097	82.2542	1.000
4	133	38.0744	84.5015	1.000
5	135	38.0525	86.1055	1.000
6	137	38.0371	88.1071	1.000
7	139	38.0106	91.5071	1.000
8	141	38.0008	93.5088	1.000
9	143	38.0008	96.7215	1.000
10	145	38.0171	100.0000	1.000
11	147	38.0488	103.118	1.000
12	149	38.0095	110.081	1.000
13	151	38.0525	117.205	1.000
14	153	38.0300	125.041	1.000
15	155	38.0094	134.001	1.000
16	157	38.0775	144.001	1.000
17	159	38.1075	154.005	1.000
18	161	38.0955	164.005	1.000
19	163	38.0157	174.001	1.000
20	165	41.1511	224.001	1.000
21	167	48.1811	274.001	1.000
22	169	52.1779	354.005	1.000

CHOOSE ANOTHER C = 1 OF 1000 DEG. 2

◆FERRIV

לפי פלט זה ניתן לצייר את המסיכה או לתרגמה לשימוש ישיר בכרסומה מפוקדת מחשב. במקרה שהערך הנבחר Q גבוה מדי (1300) יתקבל פלט בו ערך האינטגרל קטן מ-Q, כמוצג להלן:

CHOOSE ANOTHER 0-1 OF STOP:2:1 :

H= 200 MM

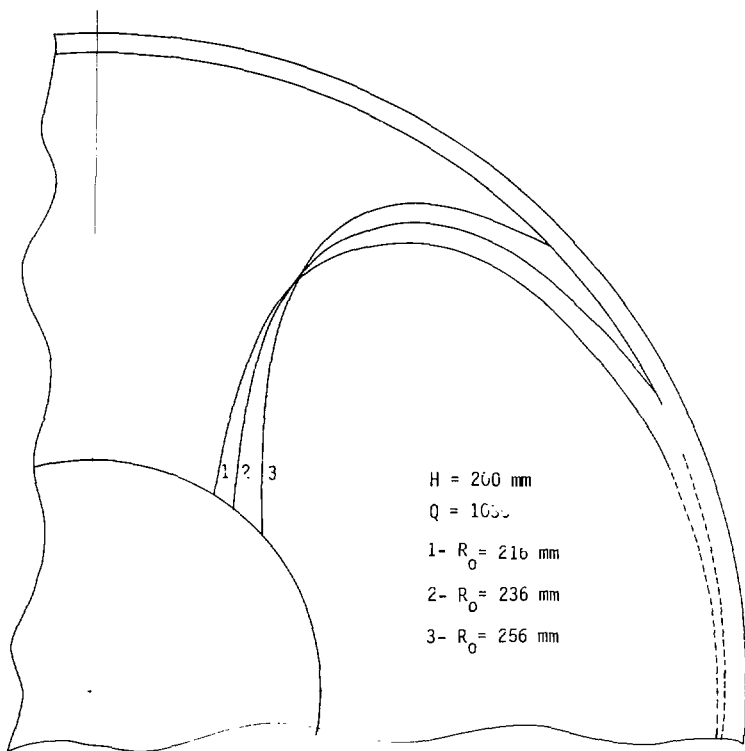
CHOOSE VALUE OF RATE INTEGRAL 0= 7 1300

CHOOSE R LIMIT: FROM RMM= 7 125 TO RMM= 7 345 NO. OF ITER= 23

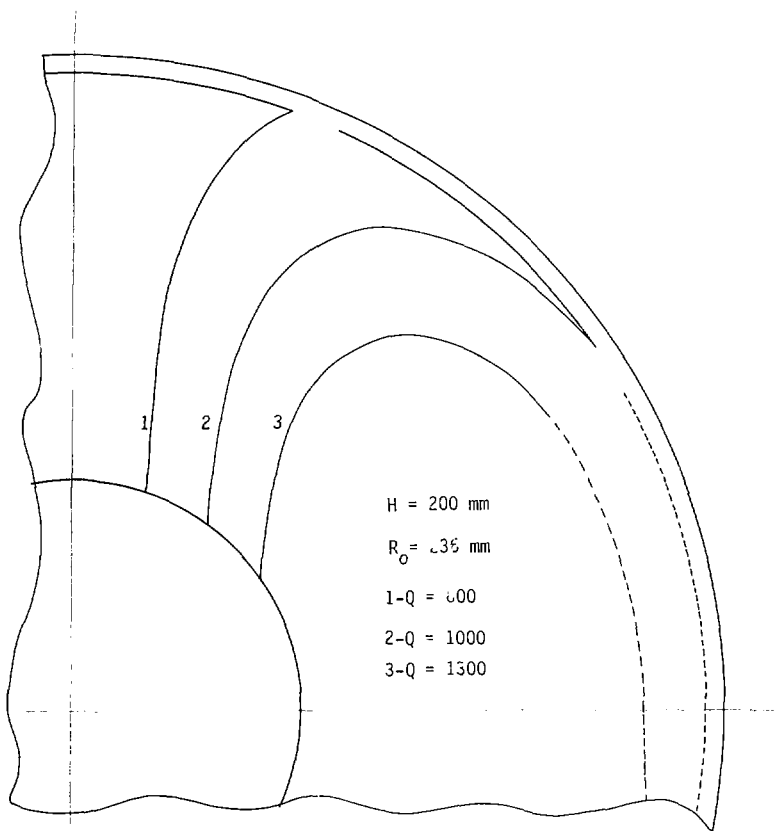
NO.	RADIUS MM	PACK HALF ANGLE, DEG.	STRING MM (CENTER TO PACK)	RATE INTEGRAL
0	125	54.52289	114.3317	1300
1	135	47.80143	111.364	1300
2	145	42.64488	111.216	1300
3	155	38.6897	113.248	1300
4	165	34.8046	117.736	1300
5	175	30.9658	119.693	1300
6	185	28.19084	121.626	1300
7	195	25.7679	122.626	1300
8	205	23.1148	123.475	1300
9	215	20.8988	123.343	1300
10	225	18.6848	141.384	1300
11	235	16.8098	146.895	1300
12	245	14.4283	151.651	1300
13	255	12.6381	155.353	1300
14	265	10.871	158.451	1300
15	275	9.2047	200.713	1300
16	285	7.4697	224.848	1300
17	295	5.7811	257.123	1300
18	305	4.251	287.273	1300
19	315	2.8645	327.703	1300
20	325	1.6	387.76	1357.45
21	335	1.0	457.76	1174.15
22	345	1.0	527.703	1039.65

CHOOSE ANOTHER 0-1 OF STOP:2:1 :

בציורים 11 ו-12, מוצגות מסיכות אחרות שחושבו לערכים שונים של  $R_0$  ושל  $Q$ . בציור 13 מוצגת מסיכה שנבנתה על-פי החישוב עבור  $R_0 = 236 \text{ mm}$  וגובה דגמים מעל התוחת  $H = 200 \text{ mm}$ . רדיוסי הקשתות הגבוליים הם  $Y_1 = 125 \text{ mm}$  ו- $Y_2 = 345 \text{ mm}$ , מתוך מטרה להגיע לציפוי אחיד בתחום  $135 \text{ mm} \leq R \leq 335 \text{ mm}$ .

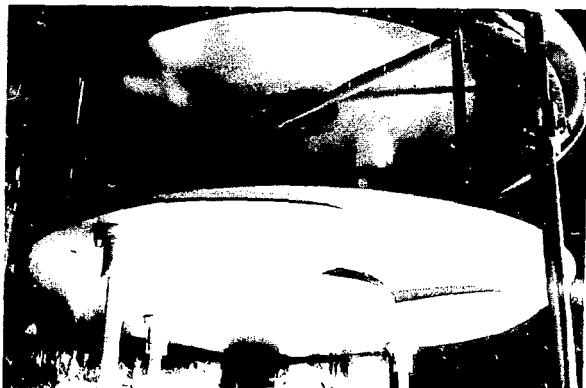


ציור 11 מסיכות המחושבות לערכים שונים של  $R_0$  עבור  $Q$  נתון.



ציור 12 מסיכות המחושבות לערכי Q שונים, עבור  $R_0 = 236 \text{ mm}$ ,  $H = 200 \text{ mm}$ .

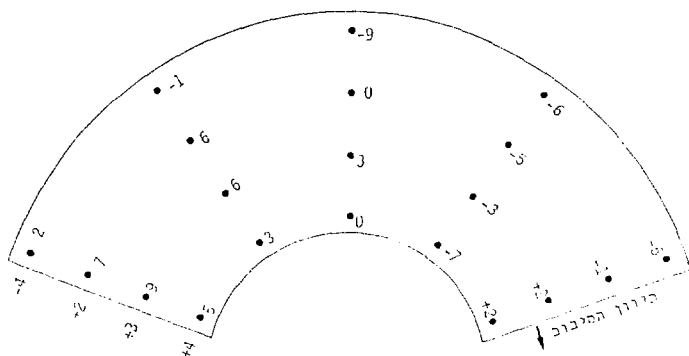




צורה 13 מסיכה שנבנתה על-פי החישוב עבור  $R_0 = 236 \text{ mm}$ ,  $H = 200 \text{ mm}$ , במטרה להבטיח אחידות ציפוי בין הרדיוסים  $Y_1 = 135 \text{ mm}$  ו- $Y_2 = 335 \text{ mm}$ . קוטר נושא המצעים שמעל המסיכה הוא כ- $700 \text{ mm}$ .

## 6 חוצאות ומסקנות

ציור 14 מראה את מפת האחידות שהתקבלה בנייתו דינמי עם שימוש במסיכה (ציור 13). בציור 7 לעיל הוצגה מפת האחידות שהתקבלה בנייתו דינמי ללא שימוש במסיכה. הערכים המופיעים במפות מציינים את הסטייה באחוזים מן הערך הממוצע. המספרים שבצד שמאל הינם ממוצעים שהתקבלו בכל שורה (R קבוע). אנו רואים כי ללא מסיכה, תחום הישתנות העובי הוא כ-35% סביב הערך הממוצע; בתוך כל שורה העובי הממוצע עולה כלפי הקצוות, וקיים פער של כ-60% בין השורה הפנימית לחיצונית. הערכים המופיעים בציור 14 התקלו כממוצעים של שלושה ניסויי כיוול שונים. תחום הישתנות העובי ירד לכ-9%, והפער בין הדיוס הפנימי והחיצוני של ה'בננה' ירד לכ-4% ככלר.



ציור 14 מפת האחידות (הסטיות באחוזים מן הערך הממוצע), שהתקבלה בנייתו דינמי תוך שימוש במסיכה. התוצאות התקלו כממוצעים של שלושה ניסויי כיוול שונים.

מן התוצאות ניתן להגיע למסקנות הבאות:

(א) המסיכה, למרות שהיתה מהדגם הראשון שנכנה ונוסה, הביאה לשיפור משמעותי באחידות הציפוי. חוסר האחידות בעובי ירד אל מתחת ל-10% סביב הערך הממוצע.

(ב) התופעה של עליית העובי בשוליים ירדה עם הצמרת המצע לנושא שטוח הכולט אל מעבר לקצותיו.

(ג) ניתן להכניס תיקון נוסף במבנה המסיכה כדי לשפר את הממוצע של ההתפלגות הרדאלית של העובי (עובי עורף בשורות המרכזיות ביחס לשורות החיצוניות) וכדי לפצות על התרוששות העגן סמוך לרפנות תא הנידוף (הקשח החיצונית של ה'בננה').

(ד) חוסר האחידות בין הגזרות השונות של ה'בננה' מוסבר באי-אחידות בקצב הסיבוב, הנובע מכיוון לקוי של ציר המנוע ביחס לציר הקרוסלה. הוזה הדדית של שני צירים אלה זה מזה נחשבאט בסטייה מחזורית ממחירות סיבוב זוויחית קבועה ולחיכך בפיוור עוביים מחוז על-פני ה'בננה'.

References

סימוני

1. R.J. Gnaedinger "Some calculation of the thickness distribution of films deposited from large area sputtering sources", J. Vac. Sci. and Tech. 6(3), (1969) 355-362.
2. V.G. Deppisch, "Schichtdickengleichmassigkeit von aufgestäubten Schichten - Vergleich zwischen Berechnungen und Praktischen Ergebnissen" "Vakuum Technik" 30, Leybold-Heraeus special edition 12 - S 22.1, May 1981.
3. W.D. Westwood, "Calculation of deposition rates in diode sputtering systems" J. Vac. Sci. and Tech. 15(1), Jan/Feb (1978), 1-9.
4. J.A. Thornton "Diagnostic methods for sputtering plasmas", J. Vac. Sci. and Tech. 15(2), March/April (1978), 188-192.
5. I.A. Blech, D.B. Fraser, S.E. Haszko, "Optimization of Al step coverage through computer simulation and scanning electron microscopy", J. Vac. Sci. and Tech. 15(13), (1978).

1 הפנה  
 תוכנית החישוב, הכתובה בשפת Basic, לקביעת גיאומטריית המסיכה על פי נתוני הכיול הסטטיים.

```

10 REM *****MATH FOR PLATE TUMBLE*****
20 PRINT "H = GUN TO SUBSTRATE HEIGHT, MM= ":
30 INPUT H
40 PRINT
50 PRINT "R0 (MM)= ":
60 INPUT R0
70 PRINT
80 PRINT "R2 (MM) (R1 FROM GUN CENTER)= ":
90 INPUT R2
95 PRINT
100 PRINT "N1 (NO. OF STEPS OF R1)= ":
110 INPUT N1
120 DIM A(100)
140 FOR I= 0 TO (N1-2) STEP 5
150 READ A(I)+A(I+1)+A(I+2)+A(I+3)+A(I+4)
160 NEXT I
170 DATA 100, 100, 99, 98, 95, 5
171 DATA 92.5, 90, 87.5, 85, 81
172 DATA 78, 72.5, 67.5, 62.5, 57.5
173 DATA 52.5, 48, 44, 40, 37
174 DATA 32.5, 20, 27, 24, 21
175 DATA 18.5, 17.5, 15, 14, 12.5
176 DATA 12, 11, 10, 9.5, 8.5
177 DATA 8, 7, 6.5, 6, 5.5
200 PRINT
210 REM T0=MAX FACTOR ANGLE; T1=STEP OF T0/DEG; N2=NO. OF STEPS
220 LET T0=120
230 LET T1=2.5
260 LET N2= INT (T0/T1+.5)
280 DIM M(100)
290 PRINT
300 PRINT "CHOOSE R= RADIUS FROM BASEPLATE CENTER, MM= ":
310 INPUT R
320 REM R1= RADIUS FROM GUN CENTER
321 GOSUB 325
322 GOTO 600
325 PRINT
330 FOR J= 0 TO (N2-1)
340 LET T=J*T1/57.2958
350 LET R1= TOP (R+R+R0-R)-2*R*RO* (COS T)+1)
360 LET M=PI*R2
370 LET K= INT (M)
380 LET P=M-K
390 LET N(J)=A(K)* (1-P)+A(K+1)*P
400 NEXT J
520 REM C(J)=RATE INTEGRAL OVER HALF VECTOR,MM., ANGLE=J*T1
530 DIM C(100)
540 LET C(0)=M(0)
545 FOR J=1 TO (N2-1)
550 LET C(J)=C(J-1)+N(J)
560 NEXT J
570 RETURN
600 PRINT
605 PRINT "PRINT RATE INTEGRAL (1) OF PROCEED TO MATH (2)":
606 INPUT E

```

```

607 IF E>1.5 GOTO 800
610 PRINT
615 PRINT
620 PRINT "RATE INTEGRAL AS FUNCTION OF MACK HALF ANGLE AT P=";P;"MM."
630 PRINT
640 FOR J= 0 TO (N2-1) STEP 5
650   PRINT (I(J)+I(J+1)+I(J+2)+I(J+3)+I(J+4))
660 NEXT J
670 PRINT
700 PRINT "ANOTHER P(1) FEEDED TO MACK(2) OF STOP(3)?"
710 INPUT U
720 IF U=3 GOTO 3000
730 IF U=1 GOTO 290
800 PRINT
805 PRINT
810 PRINT "MACK CALCULATION: GIVEN SECTOR ANGLE & VOL. P FOR P0=";P0;"MM."
820 PRINT
825 PRINT "He = "H;"MM"
826 PRINT
830 PRINT "CHOOSE VALUE OF RATE INTEGRAL Q="
840 INPUT Q
850 PRINT
860 PRINT "CHOOSE P LIMITS: FROM (MM)="
870 INPUT Y1
880 PRINT "      TO (MM)="
890 INPUT Y2
900 PRINT "      NO. OF STEPS="
910 INPUT Z
920 LET D=(Y2-Y1)/(Z-1)
921 PRINT
922 PRINT
923 PRINT "NO.,""RADIUS","MACK HALF","STEPING,MM","RATE INTEGRAL"
925 PRINT "    ","MM","ANGLE, DEG.,""CENTER TO MACK)"
926 PRINT
930 FOR I= 0 TO (Z-1)
940   LET P=Y1+I*D
950   GOSUB 330
970   IF Q<=(N2-1) GOTO 1000
975   LET P=(N2-1)
980   LET X=180
990   GOTO 2000
1000  FOR J= 0 TO (N2-1)
1010    IF I(J)=0 GOTO 1050
1015    IF I(J+1)+I(J) GOTO 1020
1016    LET V=J
1017    GOTO 1030
1020    LET V=J+(0-I(J))+I(J+1)-I(J)
1030    LET P=0
1040    GOTO 1060
1050  NEXT J
1060  LET V=V*11
1070  LET Y3=2*P*PI/(0.114*595)
2000  GOTO 2010
2010  PRINT I+P*X+Y3*P
2020 NEXT I
2030 PRINT "CHOOSE ANOTHER Q(1) OR STOP(2)?"
2040 INPUT E
2050 IF E=2 GOTO 820
3000 END

```

