



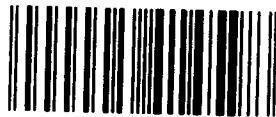
הערכת כדאיות של מתזים לצרכי פרויקט "מגדלי אנרגיה"

חבור על עבודת גמר

לשם מילוי חלקי של דרישות לקבלת תואר
מגיסטר למדעים
באבטחת איכות המוצר ואמינותו

קטי ויסברג-שיש

2166576



000005414598



הסכניון מכון טכנולוגי לישראל

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
1995 מרץ חיפה אדר ה'תשנ"ה

תקציר

העבודה הנוכחית היא חלק מפרויקט מקיף יותר שנושאו **מגדלי האנרגיה**, והיא מבוססת על מחקרים שבוצעו ומבוצעים על-ידי חברים בצוות של פרופ' דן זסלבסקי מהפקולטה להנדסה חקלאית. את תוכנת המחשב ששימשה לעיבוד תוצאות הניסויים שנערכו במעבדה לטיפות כתב ד"ר ר. גואטה במסגרת עבודת דוקטורט; ד"ר חיטרון חוקר עתה את התנהגות הטיפות בתוך ומחוץ למגדל, וסיפק את המידע הדרוש להערכת שטף טיפות המים המלוחים מחוץ למגדל. תוכנת המחשב של ד"ר גואטה מבוססת על התנאים האקלימיים באזור אילת. לכן גם העבודה הנוכחית מבוססת על אותם תנאים אקלימיים וכל החישובים בוצעו עבור מגדל בעל גובה 800 מ' (400 מ' קוטר).

מטרת פרויקט **מגדלי האנרגיה** היא ייצור חשמל על-ידי ניצול תוצר לוואי של אנרגיית השמש, במקרה זה האוויר החם והיבש הנמצא בכמויות אדירות באזורים הצחיחים של כדור הארץ. מים מותזים באוויר חם ויבש מתאדים והופכים את האוויר לקריר יותר וכבד יותר (הודות לכך שהוא קר יותר); כתוצאה מכך האוויר ירד. אם ההתזה מתבצעת בראש מגדל רחב מאוד וגבוה מאוד הממוקם באזור מדברי, האוויר החם והיבש יהפוך קריר ורווי לחות. הוא ירד בתוך המגדל תוך כדי יניקת אוויר נוסף, יאיץ ויגיע לתחתית במהירות גבוהה. שם הוא יפעיל טורבינות אוויר לייצור חשמל וייצא מהמגדל דרך מפזרים (diffusers) ביחד עם המים שלא התאדו ועדיין שומרים על הצורה של טיפות זעירות. מאחר וכמויות המים הנחוצות עבור הפרויקט הן גדולות מאד, רק מי ים או מים מלוחים באים בחשבון.

בגלל הקשר בין השטח למסה של הטיפה, תהליך הקירור יהיה יעיל יותר ככל שהטיפות קטנות יותר. האוויר יגיע מהר יותר לתכולת מים גבוהה יותר ויתקרר לטמפרטורה נמוכה יותר, האנרגיה הפוטנציאלית שלו תהיה גבוהה מזו של האוויר שמחוץ למגדל, הוא יגיע לתחתית המגדל במהירות גבוהה יותר וייצר יותר חשמל. לא כל המים מתאדים (האידיזי צורך יותר אנרגיה ככל שריכוז המלח במים גבוה יותר) והטיפות הדקות יוצאות לאוויר ועשויות להסחף למרחקים גדולים. הטיפות זעירות, בעלות קוטר של פחות מ-170 μ , נוטות לנדוד הרחק בגלל מערבולות האוויר והמומנטום הנמוך מאוד שלהן בהשוואה לכוחות הגרר הגבוהים יחסית הפועלים עליהן. הן תגרומנה לבעיה רצינית של רסס מלח על פני מרחקים גדולים אם לא תלכדנה לפני עזיבת המפזרים בתחתית המגדל באמצעים שונים.

התופעה של התנגשויות של טיפות לאורך המגדל נחקרת על-ידי חוקר אחר, ויכול להיות שבגלל המטען ומתח הפנים שלהן חלק גדול מהטיפות יתנגשו ביניהן ויצרו טיפות גדולות יותר. במקרה זה לטיפות הקטנות לא תהיה מעשית שום השפעה (חיובית) על תפוקת האנרגיה מאחר והן תובלענה מהר בתוך טיפות גדולות יותר, ותהווה אפילו בעיה בגלל עלות הייצור הגבוהה שלהן ומרחקי הנדידה הגבוהים של הטיפות שלא נבלעו. אין דרישות חוקיות לגבי רמת טיפות המלח

באוויר אלא רק דרישות לגבי רמת האבק, ולכן הגיוני להציב בתור מטרה הורדת רמת רסס המלח בקרבת המגדל לרמה סבירה, למשל לרמה שעל שפת הים או אפילו במרחק מסוים משפת הים.

הן עלות ההתזה והן עלות מניעת רסס מלח קשורים קשר הדוק לסוג טיפות המים, ואלה תלויות במתזו שנבחר. אין מתזו שעונה על כל הדרישות. יש צורך על כן לקבוע עבור כל אחד מהם את ערכו הכולל עבור הפרויקט במונחים של יצור חשמל נטו ועלות מניעת רסס מלח. מרבית מתזי הלחץ יוצרים טיפות קטנות יחסית כשעלות האנרגיה היא נמוכה, אבל תחום התפלגות קוטר הטיפות שהם מייצרים רחב מאוד וקיימת סכנה של סתימת הנחירים. מתזים מסתובבים יוצרים טיפות קטנות ואחידות יחסית, אבל בקצבי זרימה נמוכים יחסית ועלות אנרגיה גבוהה.

מטרת העבודה הנוכחית היתה לפתח שיטה להשוואה כמותית בין מתזים שונים המותאמת לשימוש הספציפי שיעשה בהם במגדלי האנרגיה, הרי היה ברור שאין אפשרות במסגרת העבודה הנוכחית לבחון את כל המתזים הקיימים, וגם לא כל המתזים הבאים בחשבון ואפילו לא כל הסוגים הקיימים. מטרת העבודה היתה, מעבר לכימות הגורמים המשפיעים בבחירה, לתת כלי למיון ראשוני של סוגי מתזים שונים. מאחר שמטרת מגדלי האנרגיה היא ייצור ומכירה של חשמל, ההשוואה האמיתית בין תכנונים אפשריים של המגדל היא על בסיס ההכנסה השנתית נטו ממנו. אבל היות ואין עדיין מידע מספיק לגבי המערכות האחרות של המגדל, אמצעי ההשוואה בין מערכות ההתזה יהיה עלות היצור הנמוכה ביותר (או ליתר דיוק התרומה הנמוכה ביותר של מערכת ההתזה לעלות היצור) כשכל הגורמים הרלבנטיים נלקחים בחשבון. כדאי להדגיש שאת המתזים יש להעריך לא במנותק אלא ביחד עם מנועיהם, אם הם זקוקים למנועים, עם מערכת הספקת המים ואולי אפילו תוך לקיחה בחשבון של המבנה שישא את המתזים, המנועים והצנרת. אבל מאחר שכמות המים הכללית הנוצרת עבור העבודה אינה משתנה באופן משמעותי ממתזו אחד למשנהו, ומאחר שמשקל המתזים והמנועים קטן מאוד בהשוואה לזה של המבנה עצמו, אנחנו נניח כאן שהמבנה (והצנרת) זהים עבור כל המתזים ולכן לא צריך לקחת אותם בחשבון בהשוואה. נניח כמו כן שמערכת הבקרה זהה בכל המקרים, אם כי הנחה זו פחות נכונה מקודמתה, כי סוג המתז, האם הוא מונע על-ידי מנוע או לא, מספרם הכולל וחלוקתם לקבוצות, עלולים להביא להבדלים משמעותיים במערכת הבקרה. חקר מערכת הבקרה הוא מעבר להיקף העבודה הנוכחית ועל כן נניח, כמו לגבי מערכת הספקת המים והמבנה, שהיא דומה עבור כל המתזים ואין צורך לקחת אותה בחשבון בהשוואה.

לא כל המאפיינים של מתז משפיעים ישירות על ייצור האנרגיה, לא את כולם אפשר למדוד ועבור חלקם מעולם לא נעשתה אפילו הערכה גסה. את צריכת האנרגיה (לחץ, חשמל, או שניהם) של המתזים אפשר לכלול ישירות בחישוב התפוקה, אבל גורמים אחרים קשה יותר להעריך כמותית ולכלול בעלות קילוואט-שעה מיוצר. בנוסף לכך, תנאי העבודה במגדלי האנרגיה אינם דומים לכל דבר שנבנה עד כה ועל כן אין אפשרות ללמוד מספיק משימושים אחרים שגורתיים יותר. קשה להעריך את העלות של מניעת רסס מלח ביציאה מהמגדלים, והמתקר בנושא טרם הושלם. טיפות מלוחות זעירות אפשר ללכוד על-ידי מטר של טיפות גדולות יותר במפזרים אחרי הטורבינות, אפשר להתקין במפזרים לוחות שטוחים שיקטינו את הדרך היעילה של הטיפות, ואפשר לרצף שטח איסוף מחוץ למגדל לניקוז מי מלח. כל אחת משיטות אלה תהיה יקרה, ראשית בגלל המתקנים שיש לבנות ולתפעל, ושנית בגלל הקטנת הייצור נטו. באשר למבנה עצמו, בניית המפזרים או מערכת הניקוז הן השקעות ראשוניות שאת עלותן יש לפזר על פני אורך החיים המצופה של

המתקן עם ניכיון מתאים. העלות של המטרת הטיפות במפזרים או של השימוש בלוחות שטוחים תכלול אולי גם רכיב של הקטנת לחץ והקטנת יצור בנוסף לעלויות הבנייה והתפעול. לעומת זאת, החזרה לים של מי המלח שנאספו תחסוך אנרגיה כי ניתן לנצל את עומד הלחץ ליצור חשמל.

מרבית המתזים המסתובבים סובלים ממגרעת הרצינית שהם מופעלים על-ידי מנועים. מנועים אלה יעבדו בסביבה לחה מאוד ומלוחה מאוד העלולה לגרום לתקלות רציניות תוך פרק זמן קצר ולהוריד באופן דרסטי את אמינותה וזמינותה של מערכת ההתזה. בין אם הם מופעלים על-ידי מנועים חשמליים או לא, כל המתזים האלה מסתובבים על מיסבים, וקרוב לדאי שמיסבים אלה יהיו הרכיב הראשון של המתז שייכשל.

אורך החיים של מתזים ומנועים בתנאי עבודה קרובים לאלה של הפרויקט שלנו אינו ידוע. אפשר לבצע ניסויים מזורזים על מנת להעריך אותנו, למרות שקשה לקבוע את קצב ההאצה כשגורמים רבים כל כך (מלח, אבנים, טמפרטורה וגרדיאנט טמפרטורה, קרינה, רוח) משפיעים על תהליך ההזדקנות. לתנאי העבודה במגדל יכולות להיות גם תוצאות סותרות: מקדם העומס גבוה, אבל מצד שני עבודה רצופה יכולה למנוע בעיות שנגרמות על-ידי השבתת המכונות, כגון יבוש מלח בתוך או על המפזרים והצטברות לחות במנועים הקרים.

הצעד הראשון בהערכת כדאיות המתזים היה החלטה על המתזים שייבדקו. מאחר שהתפוקה ברוטו היא פונקציה של קוטר הטיפות, הונח בהתחלה שהגורם הראשון שיש לקחת בחשבון בבחירת המתז הוא הטיפות הנוצרות (קוטר והתפלגות). קבענו רשימה של התכונות הרצויות והמשקל היחסי שלהן ונתנו "ציונים" למתזים. מרבית הקריטריונים, כגון הצורך בחומרים עמידים בתנאי העבודה הקשים, או הצורך בטיפות קטנות, הוכתבו על-ידי תנאי העבודה של המגדל. אחרים, כגון עלות נמוכה ורגישות נמוכה לשינויים, הם דרישות כלליות יותר. קבענו רשימה מועדפת שלהם ורכשנו את הדגמים שנמצאו ראויים לבדיקה על סמך קריטריונים אלה. החומרים שמתאימים לסביבה המלוחה של מגדלי האנרגיה הם חומרים פלסטיים קשיחים (פלואורופחמנים) ופלדת אל-חלד.

הסוגים שנמצאו ראויים לבדיקה הם מתזי נחירים פשוטים, מתזי סחרור ומתזים מסתובבים. אי לכך רכשנו את המתזים הבאים:

1. Micromax של Micron (MX): מסתובב, התנועה הסיבובית נגרמת על-ידי מנוע חשמלי, עשוי משני גביעים קונצנטריים ומכסה שטוח, המים מוזנים בלי לחץ בין שני הגביעים ומחולקים באופן אחיד סביב לגביע החיצוני על-ידי התנועה הסיבובית. אפשר לשלוט בנפרד על קצב הזרימה ועל מהירות הסחרור.

2. Turbomax (דגם ניסיוני, באדיבות Micron - TX): הגיאומטריה דומה לזו של ה-Micromax, אבל התנועה הסיבובית נגרמת על-ידי סילון מים המגיע משני פתחים משיקים במכסה, שם אפשר

להשתמש בנחירים בעלי גודל שונה (כחול 0.5 מ"מ, תפוז 1 מ"מ, אדום 1.5 מ"מ). קצב הזרימה ומהירות הסחרור תלויים בגודל הנחיר ובלחץ.
 3. X15 של Micron: מסתובב, התנועה הסיבובית נגרמת על-ידי מנוע חשמלי. הוא עשוי 15 גביעים בשכבות, המים מוזנים בלחצים נמוכים ועוברים דרך פתחים קטנים מהציר המרכזי לגביעים. קצב הזרימה תלוי בלחץ, ומהירות הסחרור נשלטת על-ידי הכוח החשמלי.

4. ConeJet של TXVS - 18 orange - CJ) Spraying Systems: נחיר מוזן במים תחת לחץ. ה-TXVS-18 נבחר בשביל הניסוי מבין כל הגדלים האפשריים בגלל תחום לחצי העבודה וקצבי הזרימה שלו (לפי הקטלוג של Spraying Systems) בהנחה שלא קצבי זרימה נמוכים מדי ולא לחצי עבודה גבוהים מדי יהיו מעשיים.

5. SpiralJet של (BSJ 1/4" Hollow Cone - SP) Spraying Systems: המים מוזנים תחת לחץ ומסוחררים בפנים, עוזבים בצורת חרוט חלול. SP קיים במספר גדלים, אנחנו בדקנו את הקטן ביותר, בהנחה שהאחרים יצרו טיפות גדולות יותר. קיימת גרסת חרוט מלא אבל היא לא הייתה זמינה.

הצעד השני היה חישוב תפוקת האנרגיה הצפויה מהמתזים בתצורות שונות (קצב זרימה, מהירות סחרור, לחץ). את התפוקה הממוצעת השנתית הגבוהה ביותר קיבלנו עבור CJ (מעל ל-300 מגהואט) ו-X15 (280-285 מגהואט), בגלל הטיפות הקטנות ששני המתזים מיצרים. אחריהם בא SP עם תפוקה של כ-250 מגהואט, בגלל השילוב של טיפות קטנות (אם כי באחוזי נפח נמוכים יותר משל CJ ו-X15) והפסדי עומד נמוכים. התפוקה של TX היא בין 239 ו-257 מגהואט, והתפוקה של MX היא הנמוכה ביותר (176-246). למרות שהטיפות שהוא יוצר הן גדולות מאלה ש-MX יוצר, התפוקה של TX גבוהה יותר הודות להפסדי העומד הנמוכים מאוד שלו.

הצעד השלישי היה החלטה על מדיניות ההחלפה של המתזים. מאחר שהמידע שיש לנו הודות לאורך החיים מוגבל מאוד ולא רלבנטי ליישום שלנו, הגישה הנכונה בקביעת תדירות החלפת המתזים הייתה להיות שמרני מאוד ולקחת בחשבון את התרומה היחסית של מערכת המתזים לעלויות המגדל וחשיבותה היחסית. תרומתה לעלות הכללית של בניית המגדל נמוכה מאוד ואפילו זניחה בהשוואה למבנה בגובה 1000 מ', טורבינות, גנרטורים, מערכת הספקת מים; תרומתה להוצאות התפעול אמנם איננה זניחה, אבל רחוקה מלהיות המשמעותית ביותר; אבל תרומתה לאבדן יצור אפשרי בהחלט משמעותית. מה שאנחנו חוסכים על-ידי הנחת אורך חיים ארוך יותר ולכן החלפת מתזים לעתים פחות קרובות אנחנו עלולים להפסיד (וגם יותר) באנרגיה שאנחנו לא מיצרים בגלל מערכת התזת הפועלת הרבה מתחת לכושר המלא שלה. מומלץ על כן להיות בצד הבטוח ולהניח אורך חיים שמרני, לפחות בהתחלה.

הערכה מדויקת של העלות הכוללת של מערכת ההתזת (ומערכת הספקת המים) צריכה לכלול, בנוסף לעלויות התפעול השוטף (כולל עלות מניעת רסס מלח), את עלויות הכשל ורכיביו השונים: ירידה ביצור, אולי (מעבר לאחוז קריטי) עצירה מוחלטת של הייצור עד לתיקון, עלות כשל שלא

אובחן, עלות אבחון מוטעה של כשל (מיקום מוטעה, אופן כשל מוטעה), תיקון או החלפה לקויים. ההתנהגות תהיה שונה לגבי כל מתז ואופני הכשל אף הם עלולים להיות שונים. בהעדר נתונים מדויקים מאוד ביחס לאופני הכשל האפשריים אנחנו יכולים להניח אופנים אפשריים מסוימים, אם כי לא כולם רלבנטיים לגבי כל המתזים: חלק רגישים יותר לטמפרטורה, קרינה, מלח, אלה המופעלים על-ידי מנועים רגישים לשינויים במתח ולמנועיהם אופני כשל משלהם, לגבי כולם קיימת האפשרות של כשל מכני בשלד התומך או במערכת הספקת המים. למרות ההסתברות הנמוכה מאוד של מקרים כאלה, אין להתעלם מהם כי הם עלולים לפגוע ביצור הכולל של המגדל.

השלב הראשון בהפיכת המאפיינים של מתז להערכה כמותית הוא חישוב בדרך הבאה של עלות קילואט-שעה מיוצר בתנאים "אידיאליים" (אין כשל של המתזים לפני ההחלפה) ובלי לכלול את עלות רסס המלח (שעדיין לא כומת לגמרי):

1. חשב התפוקה המירבית (נטו) הצפויה,

2. על בסיס התפוקה הזאת, כשמהירות הרוח האופטימלית ותכולת המים האופטימלית באוויר בראש הארובה בתנאים אלה ידועים, חשב מספר היחידות הנחוצות לעבודה,

3. חשב על סמך תדירות ההחלפות שהוחלט עליה את מספר היחידות שיש להחליף בשנה,

4. חשב העלות לקילואט-שעה על בסיס עלות הרכש וההתקנה השנתית של המתזים.

צריך להדגיש שוב שהמטרה העיקרית של העבודה הנוכחית היא פיתוח שיטה להערכת התאמת מתזים לצורכי הפרויקט. המתזים שנבדקו, לא חשוב כמה קפדנית הייתה הבדיקה, אינם בהכרח המתאימים ביותר לצורכי הפרויקט. אפשר למרות זאת ללמוד מהם ולהסיק מספר מסקנות בנוגע לסוגים השונים של מתזים. אפשר להסיק את המסקנות הבאות ביחס לתכונות המתזים:

- Turbomax מייצר בעלות נמוכה בהרבה (במונחים של הפסדי עומד לחץ) טיפות בעלות אותו קוטר אמצעי כמו Micromax, מה שיכול להצביע על כך שמתזים מסתובבים מופעלים מנועים מתאימים פחות לפרויקט מאשר מתזים מכניים.

- למרות הגיאומטריה הדומה, ה-Micromax מתאים פחות מה-Turbomax: אורך חייו קצר יותר בגלל המנוע, עלות הרכישה גבוהה בהרבה (שוב בגלל המנוע), האנרגיה נטו המיוצרת נמוכה יותר ורסס המלח הרבה יותר רציני.

- ConeJet, למרות תפוקתו הגבוהה, עובד בקצבי זרימה נמוכים ואורך חייו קצר. ככלל, כל הנחירים יוצרים טיפות קטנות מאוד ולכן היו נותנים תפוקות גבוהות, אבל כולם עלולים להיסתם. כדאי לבחון את האפשרות של סינון דק מאוד כדי לפתור את הבעיה, למרות שסינון הוא יקר, במונחי מותקנים ולעתים קרובות גם במונחי הפסד עומד לחץ.

• SpiraiJet נותן עלות היצור הנמוכה ביותר מבין המתזים שנבדקו (תפוקתו מעט יותר גבוהה מזו של ה-Turbomax בעלות נמוכה קצת יותר).

סביר להניח ש"רשימת העדפות" הזאת תשתנה כשגורמים אחרים יילקחו בחשבון, ובעיקר רסס המלח שכל חלופה מייצרת. למשל, קל לראות שמתזי לחץ פשוטים, למרות התפוקה הגבוהה שלהם הודות לתכולה הגבוהה של טיפות זעירות ולצריכת האנרגיה הנמוכה, יגרמו לבעיה רצינית של רסס מלח דווקא בגלל הטיפות הזעירות (קצב שקיעה כמעט פי 100 זה של מתזים מסתובבים!). כך ה-SpiraiJet, למרות שבינתיים הוא נותן בינתיים העלות הנמוכה ביותר לקילואט-שעה מיוצר, יצור רסס מלח שצפוי להיות כמעט 10-40 פעם גבוה יותר מזה של ה-Turbomax.

לקחנו בחשבון בהערכת השגיאה את אי-הדיוקים במדידת קוטר הטיפות וקצבי הזרימה, בהערכות התפוקה ובמדידות שליוו את הניסויים שבוצעו בארובה בקנה מידה מוקטן בפקולטה להנדסה חקלאית. קצבי הזרימה של המתזים נמדדו על-ידי מדידה במקביל של נפח המים הזורמים מהמתזים ושל הזמן. השגיאה בזמן היא כשניה (הזמן נמדד עם שעון עצר) ונפחי המים חושבו על-ידי שקילת המים עם מאזניים מכוילות בעלות דיוק של 1 ג'. מכאן נובע שהשגיאות במדידת קצבי הזרימה הן בין 0.2% ל-0.02%. השגיאה במדידת אנרגיית ההתזה נעה בין 4% ל-7% כשמדובר באנרגיה חשמלית (אי-דיוק המתח הוא 0.5 וולט, ואי-דיוק הזרם 0.05 אמפ'), ובין 3% ל-7% במקרה של לחץ (אי-הדיוק במדידת הלחץ הוא 0.1 בר). השגיאה במודל החישוב של תפוקות החשמל מוערכת על-ידי ד"ר גואטה בכ-10% (מדידות לאישור המודל בוצעו בארובה בעלת גובה של 21 מ', בעוד שהמתקן בקנה מידה מלא יהיה בעל גובה של כ-800 מ' לפחות). בסך הכל, השגיאה בהערכת עלויות היצור מוערכת בכ-10%.

רגישות התפוקה לשינויים בתכולת המים הכללית בראש המגדל נמוכה מאוד: לדוגמה, התפוקה של Turbomax בתכולה של 15 ג' מים/ק"ג אוויר היא 240 מגהואט ובתכולה של 12 ג' ק"ג 232 מגהואט (ירידה של 3% בייצור כתוצאה מירידה של 13% בתכולת המים של האוויר); ב-ConeJet יש לנו ירידה של 1% בתפוקה כתוצאה של ירידה של 23% בתכולת המים; ב-SpiraiJet יש לנו ירידה של 6% בתפוקה כתוצאה של ירידה של 35% בתכולת המים.

גם הרגישות לשינויים במהירות האוויר בראש המגדל נמוכה מאוד; לדוגמה, התפוקה של Turbomax במהירות אוויר של 14 מ/שניה היא 240 מגהואט ובמהירות 9 מ/שניה 218 מגהואט (ירידה של 6% בייצור כתוצאה מירידה של 35% במהירות האוויר); ב-ConeJet יש לנו ירידה של 7% בתפוקה כתוצאה של ירידה של 26% במהירות האוויר; ב-SpiraiJet יש לנו ירידה של 10% בתפוקה כתוצאה של ירידה של 31% במהירות האוויר.

לפי הנוסחה שפותחה לחישוב עלות יצור החשמל, הקשר בין עלות היצור ועלות הרכש של מתזים כמעט ליניארי; הקשר עם תדירות ההחלפות אף הוא ליניארי (תדירות ההחלפות היא עניין של החלטה ואין בו אי-ודאות). כפי שהראנו למעלה, רגישות תפוקת החשמל הכללית לשינויים בתנאי

העבודה נמוכה, ועל כן הרגישות של עלות היצור לתנאי העבודה אף היא נמוכה. אפילו אם תנאי העבודה משתנים ב-20% (תוסר שליטה כזה על תנאי העבודה הוא לא סביר), לא צפוי שעלות היצור הכוללת תשתנה ביותר מ-7%.

פותח מודל להשוואה כמותית בין מערכות התזה לצרכי הפרויקט. במקום להשוות בין תכונות בודדות אלה או אחרות של המתזים, המודל מאפשר לנו לשלב את כל התכונות בפונקציה אחת ולחפש את המינימום של הפונקציה.

למרות שהיא עדיין לא שלמה ולא את כל הגורמים הרלבנטיים יכולנו לכלול בפונקציה שפותחה, העבודה הנוכחית מהווה הבסיס לפיתוח עתידי; דיוק המדידות והמודלים ישופר בהמשך, וכן דיוק הפונקציה המוצעת. בפרט, עלות מניעת רסס מלח פעילה תיכלל בפונקציה ודיוק המודל לחישוב התפוקה ישופר.

את אורך החיים של המתזים הערכנו על בסיס מידע מינימלי, ומומלץ לבצע בהמשך בדיקות מואצות על מנת לרכוש ידע על תוחלת החיים שלהם וסטית התקן שלה וכתוצאה מכך להיות מסוגלים להחליט על מדיניות החלפה אופטימלית.

מערכת ההתזה היא רק אחת מהמערכות העיקריות של מגדלי האנרגיה. בניית המגדל עצמו, הטורבינות, הגנרטורים, מערכת הבקרה, מערכת הספקת המים ואזור איסוף מי המלח הן המערכות העיקריות האחרות של המגדל. מומלץ לבצע בדיקה דומה לגבי כל אחת ממערכות אלה ולחפש אופטימום עבור כל אחת מהן. לגבי חלק ממערכות אלה העלות האפשרית בנויה משני רכיבים: עלות הבניה/התקנה ועלות התפעול. יש לקחת בחשבון את שני הרכיבים עם התיקונים המתאימים.

כפי שנאמר למעלה, מאחר ומטרת מגדלי האנרגיה היא יצור ומכירה של חשמל, המטרה הסופית צריכה להיות הכנסה מירבית מכך. אבל לא היה טעם לחפש הכנסה מירבית כבר עכשיו, כשמרבית מרכיבי העלות העיקריים (בניה, טורבינות...) עדיין לא ידועים. אנתנו ממליצים שאחרי בחינת כל המערכות העיקריות, הערכת העלויות שלהן וביצוע אופטימיזציה ראשונית תבוצע אופטימיזציה גלובלית הכוללת כל המערכות הללו; באופטימיזציה זו נחפש הכנסה מכסימלית מהמגדל ולא עלות יצור מינימלית. בחישוב המבוסס על ההכנסה הכוללת יכול להיות שנעדיף את ConeJet על פני SpiralJet או Turbomax, למרות שעלות היצור שלו היא לא הנמוכה ביותר, כי תפוקת החשמל נטו שלו היא הגבוהה ביותר.



EVALUATING ATOMIZERS FOR
THE "ENERGY TOWERS" PROJECT

FINAL PAPER
SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN
QUALITY ASSURANCE AND RELIABILITY

BY
CATHIE WAJSBERG-CHICHE

SUBMITTED TO THE SENATE OF THE TECHNION - ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
HADAR, 5755 HAIFA MARCH 1995

Abstract

The Energy Tower project proposes the production of electricity through the exploitation of the hot and dry air found in desert regions of the globe. The atomization of water at the top of a very wide and tall chimney erected in such a region would cool the air at the top of the chimney and make it denser. The air would descend in the chimney at an increasing speed, activating turbines connected to generators at the bottom of the chimney. Due to the huge quantities of water involved, it will only be possible to use sea water. The whole process is characterized by the type of droplets dispersed into the air and the atomizer is what produces the droplets. The smaller the droplets dispersed at the top of the chimney the more efficient the cooling, the higher the atomization energy necessary to produce them and the higher the produced energy; however the smaller the droplets leaving the chimney the further they drift away from the tower. Droplets falling within a reasonable distance of the tower will be collected on a paved area around the chimney and the brine will be returned to the sea, but droplets of salt water drifting to distances beyond the paved area would create a serious environmental problem.

A method of quantitative comparison between various atomizers for the specific use that will be made of them in the Energy Towers has been developed. The contradicting demands for small droplets (high gross output), low atomization energy (usually linked to bigger droplets), short drifting distance of droplets and of course low acquisition cost and long life span, has been included in one function. Since the purpose of the Energy Towers is the production and sale of electricity, the ultimate means of comparison is the highest income from the tower, however, at this stage of the research not all the components of cost (erection of tower, turbines, generators, water supply system) are known. Furthermore the life span of the atomizers is much shorter than that of the chimney and they are to be considered as part of the current expenses rather than of the fixed costs of erection. It was therefore decided that the criterion would be the lowest cost of production (or more precisely the lowest *contribution* of the atomization system to the cost of production per kWh) when all relevant factors are considered: gross output, atomization energy, acquisition cost and flow rate of one atomizer, number of replacements per annum, air velocity and total flow rate needed at the top of the chimney. The means and cost of capture of drifting droplets are currently being investigated by another researcher and are not yet quantified enough to be included in the cost function.

Five commercially available, off-the-shelf, atomizers were investigated: two rotary, motor-propelled atomizers (Micromax of Micron-MX, X15 of Micron), one rotary propelled by water jet (Turbomax of Micron-TX), one pressure atomizer where the water whirls in a spiral-like conduit (SpiralJet of Spraying Systems-SP), one plain nozzle atomizer (ConeJet of Spraying Systems-CJ). The net output of MX is low due to the very high atomization energy it requires. The life span of MX and X15 are the shortest because of the motor; X15 yields high outputs but its flow rate is very low. The net output of CJ is the highest due the small produced droplets, but its flow rate is low and its life span short. In conclusion, the lowest production costs were those of TX and SP, TX being the one that would bring about the least problem of salt drift.

CHAPTER 1 - INTRODUCTION

Foreword

The present work is part of a more comprehensive project, that of the Energy Towers, and is based on both past and present research by members of the team of Prof. Dan Zaslavsky of the Faculty of Agricultural Engineering. The computer program used to process the data from the experiments conducted in the droplets laboratory was written by Dr. R. Guetta for his D. Sc. thesis; the new atomizer has been developed originally by Prof. D. Zaslavsky and R. Hitron for his D. Sc. thesis and is now being further developed by Z. Katzman for his M. Sc. thesis. Dr. Hitron is presently investigating the behaviour of droplets inside and outside the tower, and supplied the necessary information for estimates of salted water droplets flux outside the tower.

The computer program of Dr. Guetta is based on climatic conditions in the region of Eilat. The present work is thus based on the same climatic conditions and all computations have been made for an 800 m high tower (400 m diameter).

1.1 Description of the project

The purpose of the Energy Towers project is to produce electricity by exploitation of a by-product of solar energy, the hot and dry air to be found in huge quantities in the arid regions of the globe, without any need for costly collectors.

Water atomized in hot and dry air vaporizes and makes the air cooler and heavier (due to its water content); the air will thus descend. If the atomization takes place at the top of a very wide and tall tower situated in a desert area, the air, initially hot and dry, will become cool and saturated with moisture. It will descend in the tower and gain speed while sucking more air into it and reach the bottom at high speed. There it will activate air turbines for electricity production and leave the tower through diffusers together with the fraction of water that did not evaporate and still has the shape of very small droplets. Since the volumes of water needed for the project are tremendous it is only possible to use sea or brackish water.

Due to the relation of droplet surface to mass, the smaller the droplets the more efficient the cooling process. The air will more rapidly reach a higher water content and will cool to a lower temperature. Its potential energy will be higher as compared to that of the air outside of the tower and will reach the bottom of the tower at a higher velocity, producing more electricity. Not all the water evaporates (the higher the salt concentration in the water the more energy-consuming the evaporation) and the remaining droplets will drift away. The very small droplets, of a diameter less than 170 microns (Yaalon & Lomas, 1970) tend to drift away due to air turbulence and their very low momentum compared to the relatively high drag forces they are submitted to. They will create a serious problem of salt drift to large distances if not captured before they leave the diffusers at the bottom of the tower, by either mechanical or other means.

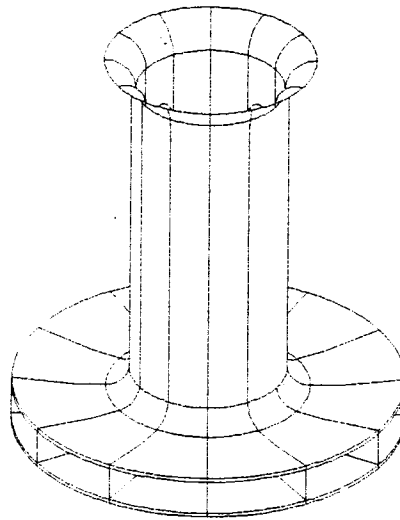


Figure 1.1 - Schematic description of the Energy Tower
 ציור 1.1 - תאור כסמטי של מגדל אנרגיה

The phenomenon of droplets collision along the tower is being investigated. It is possible that due to their charge and their surface tension a significant part of the droplets will collide and form larger droplets. In this case the smaller droplets will have virtually no (positive) influence on the energy output since they will be absorbed rapidly into larger ones, it is even possible that they will create a problem due to their high cost of production and the distances that they will drift when not absorbed. There are no legal requirements concerning the level of salt droplets in the air, only requirements concerning the dust level in the air. It is thus reasonable to set as our goal the reduction of the level of salt drift in the vicinity of the tower to an acceptable one, say that of the seashore or even a certain distance from the seashore.

Both the costs of atomization and of salt drift prevention are strongly linked to the kind of water droplets, and these are dependent on the chosen atomizer. The ideal would be an atomizer producing a monodisperse spray of the required diameter, without any danger of clogging, at a low cost of droplet production, with a very long life span; this in order to produce the highest quantity of electricity at the lowest operation cost, with the lowest level of salt drift. Practically, there is no atomizer fulfilling all our requirements. It is thus necessary to determine for each one its overall value to the project in terms of produced electricity and cost of salt drift prevention.

The type of atomizer determines the type of water droplets. Most pressure atomizers produce comparatively small droplets, at a low energy cost, but they give wide distributions of droplets diameters and the nozzles may get clogged. Other pressure atomizers have wider openings. The risks of clogging are negligible but the produced droplets are significantly larger. Rotary atomizers produce small, comparatively

uniform droplets, but they do so at comparatively low flow rates and at a high cost of energy.

1.2 Purposes of the present work

The purpose of the present work is to develop a method of quantitative comparison among various atomizers for the specific use that will be made of them in the Energy Towers. Since the purpose of the Energy Towers is electricity production, the means of comparison between atomization systems will be the lowest cost of production (or more precisely the lowest **contribution** of the atomization system to the cost of production), when all relevant factors are being considered. The other components of cost of production are the costs of operation of the turbines, of the generators, the cost of returning brine to the sea, and maintenance costs of all these systems. It is worth stressing that atomizers should not be considered alone but together with their motors, when they need motors, with the water supply system and possibly also considering the structure that will support atomizers, motors and pipes. However, since the total amount of water necessary for the operation does not vary significantly from one atomizer to the next, and since the weight of atomizers and motors is very small when compared to that of the structure itself, it will be assumed in this work that the structure (and the pipes) are identical for all atomizers so that their costs are identical for all atomizers and do not have to be taken into account in the comparison. Similarly, the control system will be assumed to be identical in all cases, although this assumption is less acceptable than the previous one since the type of atomizer, whether it is motor-propelled or not, the total number of them and their allocation in batches, may bring about significant differences in the control system. Investigation of the control system is beyond the scope of the present work and it will thus be assumed, as for the water supply structure and the structure, that it is similar for all atomizers and does not have to be taken into account in the comparison.

1.3 Quantitative comparison of atomizers for the project

Not all of the characteristics of an atomizer have a direct influence on energy production, and not all can be measured nor have they even been crudely estimated. The energy consumption of the atomizers for example, be it pressure, electricity or both, can be directly included in the computation of the output; however other factors are more difficult to assess quantitatively and to include in the cost per produced kWh. Furthermore, the conditions of operation in the Energy Towers are unlike anything else that has been erected until now, and it is thus not possible to gain all the necessary data from other more conventional uses.

The cost of salt spray prevention at the exit of the towers is difficult to assess and its investigation has not been completed. Tiny salted droplets may be captured by a shower of larger droplets in the diffusers after the turbines, flat boards may be installed in the diffusers thus reducing the effective path of the droplets and a collecting area may be paved outside the tower for brine drainage. Each of these methods will be costly, first in installations to be built and operated, and second in reduction of net production. As for the structure itself, the construction of the diffusers or of the drainage system are initial investments whose cost should be spread over the expected life span of the plant with appropriate discounting. The cost of showering the drift in

the diffusers, or the use of flat boards may also include a component of pressure reduction and production reduction in addition to their construction and operation costs. The return of the collected brine to the sea, however, will be energy-saving since the pressure head can be used for electricity production.

Most rotary atomizers have a serious drawback since they are operated by motors. Those motors will operate in a highly humid and saline environment where their functioning may be seriously impaired within a comparatively short time and they consequently may drastically decrease the reliability and availability of the atomization system. Whether operated by electrical motors or otherwise, all rotary atomizers will be spinning on bearings, and these bearings are likely to be among the first parts of the atomizer that fail.

The life span of atomizers and motors in work conditions close to those of our project are not known. It is possible, however, on the basis of their actual life spans in other applications, to roughly estimate their life span in the tower. It is also possible to conduct accelerated tests in order to evaluate it although it is difficult to determine the rate of acceleration when so many factors (salt, stone, temperature and temperature gradient, radiation, wind) influence the aging process. The work conditions in the tower also have what may be called contradictory effects: the duty factor is high (practically 100%), but the very fact of continuous work may avoid the problems expected at down-time such as the drying of salt in or on the atomizers and the accumulation of moisture in the cold motors. Furthermore for very long life spans even accelerated tests would last hundreds of hours and their cost would be proportionately large.