

מים: אתגר למדעי ההנדסה והסביבה

סאת גדעון דגן

הידרולוגיה: אחד המקצועות העתיקים בעולם
ההידרולוגיה היא מקצוע עתיק ואפשר למצוא עדויות לכך בשרידים ארכאולוגיים בארץ ובפרקי תנ"ך ידועים. כך למשל בפסיפס שבאתר ציפורי, מן המאה החמישית לספירה, המתאר את פסטיבל הנילוס.
בפסיפס נראה הנהר וסביבו תיאורים של סצנות מיתולוגיות. הפרט המעניין אותנו הוא הציור המסוגנן של הנילומטר. הנילוס היה תמיד מקור החיים של מצרים. ללא ההצפות השנתיות ושקיעת החומרים האורגניים לא הייתה מצרים יכולה להתקיים בעת העתיקה. כפי שרשם הרודוטוס לפני יותר מאלפיים שנה, "מצרים היא מתנה של הנילוס".
מקדשי מצרים העתיקה היו מצוידים בנילומטרים, מתקנים שאפשרו למדוד בדיוק רב את מפלס הנהר. הכוהנים רשמו את המפלס מדי עונה בעונה ושמרו את הרישומים לצורך חיזוי מועדי השיטפונות השנתיים ועצמתם. הרישומים שימשו את הממשל הפרעוני גם לקביעת שיעורי המסים, שכן כמות היבולים הושפעה מגובה מי הנהר.

המים הם מקור החיים, וזמינותם היא תנאי לקיומה ולהתפתחותה של החברה האנושית. ריבוי הצריכה בגלל גידול האוכלוסייה והעלייה ברמת החיים, מחד גיסא, וצמצום המשאבים הטבעיים בגלל ניצול יתר והזדהמות מקורות המים, מאידך גיסא, הופכים את בעיית המים לאחד הנושאים המרכזיים והקריטיים של המאה הנוכחית.
מכלל הדיסציפלינות הנוגעות לעניין המים התחום שאני פעיל בו הוא ההידרולוגיה. ההידרולוגיה עוסקת בחקירת החלק היבשתי של מחזור המים בטבע מבחינות מגוונות, כגון היווצרות גשם וירידת גשם, נגר וזרימת מים על פני הקרקע, שיטפונות, חלחול לתוך הקרקע ואידוי לאטמוספירה, תנועת מי התהום, שינויים כימיים וביולוגיים והשפעתם על איכות המים וכדומה.



חלק של פסיפס פסטיבל הנילוס בציפורי



פרט הנילומטר מפסיפס פסטיבל הנילוס בציפורי

הידרולוגיה עתיקה ומודרנית: הרקע המשותף

למרות ההתפתחות האדירה של מדע ההידרולוגיה בתקופה המודרנית, יש מספר מאפיינים משותפים לגישה העתיקה ולגישה העכשווית.

א. ההידרולוגיה היא דיסציפלינה כמותית: היא עוסקת בנתונים מספריים ובמודלים מתמטיים. המודלים משמשים להבנת התהליכים ולחיזוי.

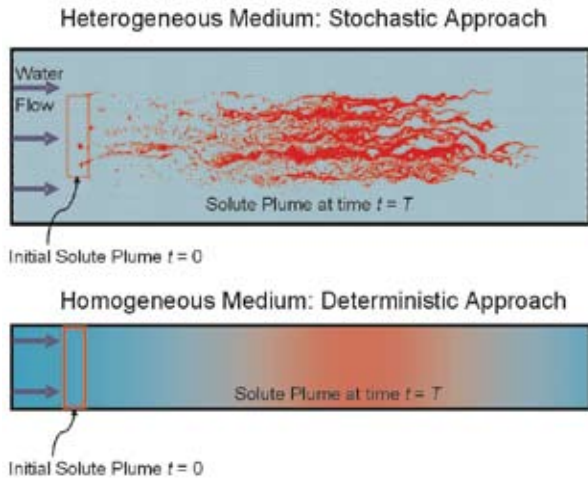
ב. ההידרולוגיה היא בעיקרה מדע יישומי: המניע העיקרי שלה והנושאים המרכזיים שהיא חוקרת קשורים לצורכי החברה האנושית. עם זאת, חלק לא מבוטל מהמחקר המודרני שואף להבנה בסיסית של הטבע.

ג. ההידרולוגיה עוסקת בחיזוי בתנאי אי-ודאות. ההידרולוג המצרי הקדום השתמש כנראה בניתוח מתוחכם של סדרות זמן כדי לחזות את התנהגות הנילוס. חיזוי לטווח קצר (שיטפונות) או לטווח ארוך (זיהום מי התהום) נתון גם בימינו לאי-ודאות, ואחד המאפיינים של המחקר ההידרולוגי הוא הניסיון לכמת את ההסתברויות ולצמצם את האי-ודאות.

את הנילומטרים הראשונים אפשר לשייך לתקופת השושלת הראשונה, כשלושת אלפים שנה לפני הספירה. ובכן, הכהונים הממונים על הרישומים ועל ניתוחם יכולים להיחשב ההידרולוגים הקדומים ביותר הידועים לנו.

עדות עקיפה למדידת מפלס הנילוס יש בספר בראשית בפרק מא, המתאר את פיענוח חלומות פרעה על ידי יוסף. יש להניח שהחיזוי של מחזור שנים שבו שבע שנים טובות ולאחריהן שבע שנות רעב הסתמך על ניתוח המדידות של מפלס הנילוס. אפשר אפוא שיוסף נעזר, במישרין או בעקיפין, בידע הידרולוגי.

מחקר מודרני בשיטות מתוחכמות על התנודות השנתיות של מפלס הנילוס (שרישומן השתמר מאז 622 לספירה ועד היום, בהפסקות) גילה שאכן יש מחזוריות של 7-8 שנים בתנודות המפלס, שאפשר לייחסה להשפעות האוקיינוס האטלנטי (F. Kandrashov and M. Ghil, Oscillatory modes of extended Nile River records [A.D. 622-1222], *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2005).



הדמיה של פיזור פלומת מזהמים במי תהום

תחום המחקר שלי משויך הן למדעי ההנדסה והן למדעי הסביבה. את הסיווג הזה קבע המכון למידע מדעי (Institute for Scientific Information - ISI), שחילק את המדע ל-22 קטגוריות ומסווג חוקרים לפי תחום כתבי העת שבהם הופיעו פרסומיהם.

ובכן, ניתן לסווג את המחקר ההידרולוגי כחלק ממדעי ההנדסה, בזכות הרצון לייצר כלים העשויים לעזור בניהול משאבי מים (למשל תכנון שאיבה מאקוויפרים), וכחלק ממדעי הסביבה, בזכות הניסיון להבין את תהליכי ההזדהמות של מי התהום ולמצוא דרכים לצמצמם או למנוע אותם. לקדמה הטכנולוגית, הנסמכת על מחקר במדעי ההנדסה, יש בלי ספק השפעה אדירה על חיינו, כפרטים וכחברה. יחד עם התרומה לעלייה ברמת החיים ובאיכותם, להתקדמות הטכנולוגית יש גם מחירים כבדים. אחד מהם הוא הנזק הסביבתי, ובכלל זה הירידה באיכות המים. אחד האתגרים העומדים בפני האנושות הוא הטיפול בבעיות הסביבה המחריפות. עלינו, המדענים בתחום ההנדסה, מוטלת חובה מוסרית להירתם למשימה זו, והטכנולוגיה יכולה לעזור לנו בזה.

עמיתי הנכבדים שהם חברי האקדמיה במדעי ההנדסה משתייכים לתחומים המסורתיים. אני הנבחר הראשון העוסק בסביבה, ואני רואה בכך אות להכרה הגוברת בקרב קהילת המדע בארץ בחשיבות הנושא. אני תקווה שאוכל לתרום לחיזוק תודעה זו.

ד. ההידרולוגיה משיקה לתחומי הכלכלה, הפוליטיקה והחברה: מדידת מפלס הנילוס וחיזוי שימשו את האדמיניסטרציה המצרית בקביעת שיעורי המסים. בימינו מודלים הידרולוגיים משמשים כלי עזר להחלטות על ניצול משאבי מים, טיפול באירועי זיהום, הגנה משיטפונות וכדומה. לכל אלה יש משמעויות כלכליות, פוליטיות וחברתיות, והמודלים מושפעים מהשיקולים הכרוכים בהן.

מודלים כמותיים של הידרולוגיה תת-קרקעית

מחקריי בהידרולוגיה עוסקים בתהליכים המתרחשים מתחת לפני הקרקע, דהיינו במים שבאזור הלא רווי ובמי התהום, בזרימתם ובתנועת המזהמים בהם. האזור הלא רווי הוא החלק העליון של הקרקע, שבו נמצאים שורשי הצמחים, ובו מי גשם ומי השקיה נעים כלפי מטה בלי למלא את החללים בקרקע. זהו אזור המעבר של המים לעומק. להבדיל, מי התהום ממלאים את נקובי התווך והם זורמים בתצורות אקוויפריות אופקיות. זהו אחד ממקורות המים החשובים ביותר בעולם כולו, ובארץ הוא מספק יותר משני שלישים מהמים.

באופן ספציפי יותר, עבודת המחקר שלי מתמקדת בפיתוח מודלים כמותיים (מתמטיים) של תנועת גופי המים והסעת מומסים. המודלים משמשים להבנת התופעות ולחיזוי השינויים החלים בכמות המים, בזמינותם ובאיכותם. בעשרים וחמש השנים האחרונות אני נמנה עם מייסדיה של גישה חדשה, שעניינה פיתוח מודלים סטוכסטיים. בגישה הזאת בודקים את השפעת חוסר האחידות של תכונות הקרקע על זרימת המים ועל הסעת מומסים. כיוון שיש אי-ודאות בדבר השתנות התכונות במעבה האדמה, התיאור הכמותי נעשה בכלים סטטיסטיים. זאת גישה שונה מהגישה המסורתית, שעל פיה תכונות התווך הומוגניות וניתנות לתיאור דטרמיניסטי.

כדי להדגים את ההבדל בין הגישה המסורתית לגישה הסטוכסטית מובאת באיור שמשמאל הדמיה של פלומת מזהמים הנעה בקרקע עם זרימת המים. בחלק העליון נראה פיזור המומסים על פי הגישה הסטוכסטית: הוא מושפע מן התכונות הלא אחידות של המסלע והגוש המזוהם מתפשט בצורה לא מסודרת, הניתנת לתיאור במונחים סטטיסטיים בלבד. לעומת זאת החלק התחתון הוא על פי הגישה המסורתית: התווך נחשב להומוגני ולפיכך המודל הדטרמיניסטי מתאר את הפלומה כמשתנה בצורה חלקה והדרגתית במרחב.