

עמוד הברזל בדלהי, הודו

דבורה קצביץ*



תמונה 1: עמוד הניצחון במתחם קוטאב מינאר

בסמוך לעמוד הניצחון ניצב עמוד ברזל שגובהו שבעה מטרים, ועליו ניצב בעבר פסל של גרודה, היצור שעליו רוכב האל וישנו. הכתובת שעל העמוד מעידה שהוא הוקדש למלך ההינדואי צ'נדרגופטה ששלט בשנים 314-573, ולא ברור איך הוא הגיע לכאן. העמוד הוא אובייקט מטלורגי שנחקר רבות לאורך השנים. הוא נוצק במאה הרביעית

עמוד הברזל נמצא בתוך מתחם אשר נקרא קוטאב מינאר ונמצא בדרום דלהי שבהודו. מתחם קוטאב מינאר (Qutab Minar) קרוי על שם הסולטן הראשון של דלהי, קוטאב א-דין אייבק. ב-1193 החל קוטאב לבנות את עמוד הניצחון, המסמל את ניצחון האיסלם על עובדי האלילים, אך הוא מת לאחר ארבע שנים, כשרק הקומה הראשונה הושלמה. יורשיו הקימו את ארבע הקומות האחרות, והצריח שבנו מתנשא לגובה של 37 מטר.

* דבורה קצביץ, מורה לכימיה, תיכון אזורי, גדרה, עורכת העיתון "על-כימיה", דוקטורנטית בקבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

** תמונה בכותרת: עמוד הברזל בדלהי, הודו.

לספירה מסגסוגת שמכילה 98% ברזל, ופלא גדול הוא שלא החליד כבר 1600 שנה.

היו שתי תיאוריות עיקריות שניסו להסביר את עמידותו של עמוד הברזל, הראשונה קשורה בתנאים הסביבתיים, והשנייה מתמקדת בהרכב המתכת עצמה. התיאוריה הסביבתית הופרכה, שכן תנאים סביבתיים דומים לא מנעו היווצרות קורוזיה רבה באובייקטים אחרים העשויים מברזל. ההסבר אשר יופיע בהמשך מתמקד במחקר מטלורגי אשר אפיין את המתכת הרכבה וכן את השכבות שנוצרו עליה.

תוצר הקורוזיה של ברזל - חלודה, אינו תוצר יחיד אלא מגוון של תרכובות. הרכבה של החלודה משתנה עם הזמן ותלוי בהרכב הכימי של הסביבה, בטמפרטורה ובזרימת התמיסה (אם האובייקט נמצא בתוך תמיסה). מנגנון היווצרותה הוא אלקטרוכימי. בין אזורים אנודיים וקתודיים "נפגשים" יוני OH^- ו- Fe^{2+} ויוצרים $\text{Fe}(\text{OH})_2$. הידרוקסיד זה נוצר רק בהיעדר חמצן מומס. כאשר יש חמצן מומס במים, ה- $\text{Fe}(\text{OH})_2$ מתחמצן מיד ומתקבל הידרו-ג'ל אמורפי $\text{Fe}(\text{OH})_3$ בגוון אדום-חום. $\text{Fe}(\text{OH})_3$ יכול לעבור פילמו, ונוצרים "פולימרים אנאורגניים", אבל מקובל לומר שהוא (הידרוקסיד ברזל תלת ערכי) "מזדקן" (תוך יציאת מולקולת המים) ונוצרות צורות בעלות גבישיות שונה:

$\gamma - \text{FeOOH}$ (Lepidokrochite),

$\alpha - \text{FeOOH}$ (Goethite)

$\delta - \text{FeOOH}$ (Ferroxyhite)

העדיפות לקבלת אחת הצורות, כפי שנאמה, תלויה בתנאים: טמפרטורה, זרימה או סטגנציה וזמן.

הגבישיות השונה של תוצר הקורוזיה של ברזל היא המפתח לעמידותו של עמוד הברזל בדלהי, שכן גבישיות תוצר הקורוזיה יכולה להסביר את יצירת שכבת ההגנה על פני העמוד. כדי שתיווצר שכבת הגנה על פני מתכת צריכה להיות התאמה מרחבית בין המתכת והתחמוצת שנוצרת. התאמה זו תלויה בגודל תא היחידה של המתכת ובגודל תא היחידה של הגביש הנוצר בתהליך הקורוזיה. פילינג ובדוורט (Pilling - Bedworth) ניסחו עיקרון אשר יכול לחזות האם תוצר הקורוזיה של מתכת מסוימת יהווה שכבת הגנה או לא. כאשר היחס בין נפח תא היחידה של התחמוצת לבין נפח תא היחידה של המתכת קטן מ-1, המאמצים בקרום גורמים לסדקים בקרום התחמוצות, והן קרמיקות שבירות. כאשר יחס זה גדול יותר מ-2, המאמצים גורמים להתקלפות של הקרום מהמתכת (ירידת התדבקות, הפרדות). בשני המקרים הנ"ל לא תיווצר שכבת הגנה. כאשר היחס בין נפח תא היחידה של התחמוצת לבין נפח תא היחידה קטן מ-2.2 וגדול מ-1 מתקבלת שכבת הגנה. עמידותו של העמוד מיוחסת ליצירת שכבת הגנה על פני הברזל מהסוג $\delta - \text{FeOOH}$ - חוקרים משערים שהרכבו הכימי המיוחד של הברזל, שכולל אחוז גבוה יחסית של זרחן וכן ריכוז נמוך ביותר של גופרית, הוא הטריגר ליצירת סוג תחמוצת זה. הזרחן שימש כזרז לתגובה כימית שיצרה את שכבת ההגנה על פני המתכת. אז דווקא הקורוזיה של העמוד היא זו שמגנה עליו.

מקורות:

http://www.eshiusa.org/Articles/dip_corrosion_july05_feature.pdf

http://home.iitk.ac.in/~bala/journalpaper/journal/journalpaper_17.pdf

http://www.iitk.ac.in/infocell/Archive/dirnov1/iron_pillar.html