



חוות סנפירים בע"מ

נחושת כ"פתרון קסם" אוניברסלי בבריכות נוי ואקווריומים- סיכונים

ד"ר גל הרצוג, חוות סנפירים בע"מ

עריכה: חופית הרצוג

הוגש לפרסום: 7/5/20



תקציר

נחושת (Cu) משמשת מזה עשרות שנים כאמצעי יעיל לשליטה בטפילים, אצות וחסרי חוליות בבריכות נוי ואקווריומים. עם זאת, יעילותה הגבוהה נובעת ממנגנוני פעולה לא סלקטיביים הפוגעים במגוון רחב של מערכות ביולוגיות, החל בפרוטוזואה (חד תאיים) ועד דגים וחיידקי ניטריפיקציה (בקטריה חיונית). מאמר זה סוקר את מנגנוני הפעולה של נחושת ברמה הכימית והתאית, את השפעתה על זמינות ביולוגית, ואת ההשלכות של חשיפה כרונית לריכוזים נמוכים. בנוסף, דונות ההשלכות על יציבות המערכת

הביולוגית, לרבות פגיעה במיקרוביום ובביופילם, וכן מוצגות גישות לניהול והסרת שאריות נחושת. המסקנה המרכזית היא כי נחושת אינה "טיפול" במובן הקלאסי, אלא גורם כימי רב-עוצמה הדורש שליטה מדויקת והבנה מערכתית ואינה מתאימה לשימוש של חובבים.

מבוא

השימוש בנחושת במערכות מים, מבוסס על פעילותה הביוצידית (יכולת של חומר להרוג/ לעכב אורגניזמים לא רצויים) הרחבה ועל זמינותה הגבוהה. תרכובות כגון copper sulfate משמשות באופן שגרתי לטיפול

היא יציבה מאוד אך קלה להסרה בסיום הטיפול. בארץ, נפוצים פחות מוצרים של חברת FRITZ ו- Endich המשווקים נחושת כ Chelated Copper. יש כאן שימוש במולקולות אורגניות, כמו חומצת לימון או EDTA, כדי לקשור את הנחושת. היא יציבה מאוד במים קשים אך לעיתים קשה יותר להסרה.

ריכוזי נחושת מומלצים לטיפול

נחושת משמשת ככלי טיפולי, הודות לרעילותה הסלקטיבית, המנצלת את העובדה שטפילים, חלזונות ואצות רגישים למתכת בריכוזים נמוכים מאלו הקטלניים עבור רוב הדגים. בטיפול נגד טפילים חיזוניים (כמו נקודות לבנות- *Ich*), מקובל לשאוף לריכוז טיפולי מדויק (0.15-0.25 PPM), בעוד שנגד אצות וחלזונות בבריכות נוי נעשה שימוש בריכוזים נמוכים יותר המספיקים לקטילתם (0.05-0.1 PPM). עם סיום הטיפול, יש לסלק את שאריות הנחושת מהמים כדי למנוע נזק מצטבר. הדרך היעילה ביותר, היא ביצוע החלפות מים נרחבות בשילוב עם סינון דרך פחם פעיל. באקווריומים עם מצע חולי, מומלץ לשאוב את המצע היטב, שכן הנחושת נוטה לשקוע ולהצטבר בו, מה שעלול להוות סכנה עתידית לחסרי חוליות ודגי קרקעית.

השפעות מסוכנות על יציבות האקווריום

נוכחות נחושת במים, משפיעה באופן דרמטי על המיקרוביום (מכלול המיקרואורגניזמים באקווריום) ועל היציבות האקולוגית של המערכת כולה. כבר בריכוזים מזעריים (מ 0.01 PPM), הנמוכים מהסף הטיפולי, מתחילה פגיעה קלה בקצב הפעילות של חיידקי הניטריפיקציה. המערכת עדיין מתפקדת, אך היא הופכת לפחות "סלחנית" לעומס אורגני. יוני הנחושת חודרים לשכבת הביופילם (מבנה המורכב מקהילת חיידקים

בפרוטוזואה (חד תאיים אאוקריוטים), לשליטה בהתפרצות אצות ולהדברת חסרי חוליות. עם זאת, בניגוד לחומרים סלקטיביים יותר, נחושת פועלת דרך מנגנונים ביוכימיים בסיסיים, ולכן השפעתה אינה מוגבלת למטרה הטיפולית בלבד. בריכות נוי ואקווריומים, הן מערכות ביולוגיות מורכבות ולכן, הבנת האינטראקציות בין נחושת לבין רכיבי המערכת, היא תנאי הכרחי לשימוש מושכל בה.

"מופעים" שונים של נחושת במים ובתרופות

נחושת מופיעה באופנים שונים במים (ספציאציה). רעילותה, אינה נקבעת על פי ריכוזה הכולל, אלא בעיקר על פי ריכוז היונים החופשיים (Cu^{2+}) שהם הפעילים ביולוגית. במים, נחושת יוצרת קומפלקסים עם קרבונטים (בעיקר חומרים המשמשים כבופרים), הידרוקסידים (הפן הבסיסי, אלקלי, של המים) וחומר אורגני מומס. תהליכים אלו מפחיתים את זמינותה הביולוגית. במים רכים ובעלי pH נמוך, שיעור היונים החופשיים עולה ולכן גם רעילותה עולה בהתאם. כך למשל, באקווריום בו מגדלים דיסקוסים, באופן טבעי, המים רכים ובעלי pH נמוך ולכן באקווריום שכזה שימוש בנחושת יכול להיות עניין מסוכן. במדגים מקצועיים, מוכר בעיקר השימוש בגרגרים כחולים של נחושת גופרתית (Copper Sulfate) המשווקים גם כן לחובבים ע"י חברת API. נחושת במצב הזה, משחררת כמות גדולה של יוני נחושת חופשיים מיד עם כניסתה למים. אומנם זהו הטיפול הזול והחזק ביותר, אך גם המסוכן ביותר. שיוק נוסף של נחושת הוא בצורת נחושת-אמין Cupramine (חברת SEACHEM למשל). הצורה הזאת, נחשבת לדור המתקדם והבטוח ביותר לחובבים, שכן

הצמודים (למשטח) ופוגעים ישירות בחיידקי הניטרופיקציה (חיידקים חיוניים הממירים אמוניה רעילה לניטריט וניטראט). עיכוב פעילותם של חיידקים אלו, משבש את מחזור החנקן ומוביל להצטברות מסוכנת של אמוניה וניטריט, חומרים רעילים ביותר לאורגניזמים אקוואטיים. פגיעה זו ב"פילטר הביולוגי" מערערת את ההומאוסטזיס, אשר עלול להוביל לקריסה כוללת של האיזון הביולוגי באקווריום או בבריכה. בריכוזים של 0.1-0.2PPM, שבו רוב הטיפולים נגד טפילים מתבצעים, מתרחש עיכוב של כ-50% עד 80% בפעילות חמצון האמוניה. בנקודה זו הביופילם מתחיל להיחלש וקיימת סכנה ממשית להצטברות אמוניה במים. אי לכך, מומלץ בזמן הטיפול להפחית האכלה ולמדוד תדיר את כמות החנקות במים, כדי להימנע מהצטברותן וסיכון הדגים.

השפעות אקוטיות על שוכני האקווריום ובריכת הנוי

נחושת פועלת במספר מנגנונים ביוכימיים מקבילים, בניהם: יצירת סטרס חמצוני דרך רדיקלים חופשיים (Reactive Oxygen Species) בעיקר דרך "תגובת פנטון": יוני נחושת חופשיים מגיבים עם מי חמצן בתא ומייצרים רדיקלים חופשיים חזקים מאוד. רדיקלים אלו הם מולקולות לא יציבות שתוקפות באופן אגרסיבי את רכיבי התא, בניהם: הממברנה (המעטפת), החלבונים (שינוי מבנה מרחבי ואי תפקודם) וה-DNA (גרימת שברים ויצירת מוטציות). בנוסף, הנחושת משבשת את תפקוד המיטוכונדריה ומנטרלת חומרים נוגדי חמצון המגינים על התא מפני נזקי החמצון. כל אלה מובילים להצטברות נזק שעלול להביא למות התא. פגיעה באנזימים באמצעות קשירה לקבוצות -thiol יוני נחושת נקשרים בעוצמה לקבוצות תיול (SH-) בחלבונים, ובכך

משנים את המבנה המרחבי של אנזימים או חוסמים את האתר הפעיל שלהם. קישור זה משבית את הפעילות הביולוגית של האנזים ולעיתים אף דוחק מתכות חיוניות אחרות (כמו אבץ) ממיקומן, מה שמוביל לשיבוש חילוף החומרים בתא. שיבוש חדירות ממברנות של תאים - מתרחש בשני ערוצים מרכזיים: ראשית, הוא מעורר חמצון שומנים (Lipid Peroxidation), תהליך שבו רדיקלים חופשיים תוקפים את חומצות השומן במעטפת התא ויוצרים בה "חורים" מבניים. שנית, קשירה לחלבוני הובלה ותעלות יונים בממברנה, ובכך הנחושת משבשת את הוויסות העדין של כניסת ויציאת חומרים (כמו נתרן ואשלגן). התוצאה היא דליפה תאית, אובדן הומאוסטזיס וקריסה אוסמוטית של התא.

רעילות והשפעות ארוכות טווח

רעילות הנחושת באורגניזמים החיים בבריכות הנוי והאקווריומים מתבטאת בשיבוש מערכות חיוניות בדרכים ובריכוזים שונים. הרגישים ביותר הם חסרי החוליות. שרימפס למשל, עלולים להיפגע מריכוז אפסי של נחושת במים (כבר מ 0.03PPM). המערכות הפיזיולוגיות שלהם, במיוחד אלה הקשורות בהתנשלות, העברת האלקטרונים במיטוכונדריה ומחזור הדם, מבוססים בחלקם על ריכוזי נחושת ולכן נוכחותה במים, פוגע באופן קרדינאלי בהומאוסטזיס בייצור. ריכוז נחושת של מעל ל 0.08PPM, כבר יגרום לאצות לנזק משמעותי. נחושת מדכאת אצות על ידי שיבוש תהליך הפוטוסינתזה ופגיעה ישירה בכלורופיל, מה שמוביל לעצירת גדילה. במקביל, יצירת סטרס חמצוני חריף גורמת לפירוק ממברנות התא ולקריסת המושבה. ב 0.1PPM ומעלה, שבלולים וחלזונות יפגעו. מעל ל 0.15PPM דגים יפגעו. הראשונים יהיו הדגים שאינם

מטורפים, פגיעה זו משבשת את יכולת ההישרדות והרבייה שלהם. בנוסף, חשיפה לרמות נמוכות של נחושת, מובילה גם לעקה כרונית ודיכוי חיסוני. היא מאלצת את הדג להשקיע אנרגיה רבה בפינוי הרעלים ובתיקון נזקי חמצון. השקעת אנרגיה במסלול זה, מחלישה את מערכת החיסון והופכת את הדג לרגיש למחלות.

דיון ומסקנות

אומנם נחושת היא כלי יעיל ומקובל בהתמודדות עם טפילים, אך היא אינה סלקטיבית. מנגנוני הפעולה שלה פוגעים בכלל רכיבי המערכת הביולוגית—מדגים ועד מיקרואורגניזמים. יעילותה הגבוהה נובעת מחוסר הסלקטיביות, אך תכונה זו גם מגבילה את השימוש הבטוח בה. במערכות אקווקולטורה מודרניות, יש לראות בנחושת גורם מערכתי ולא פתרון נקודתי. השימוש בה מחייב שליטה מדויקת, ניטור מתמשך והבנה עמוקה של כימיית המים ושל הדינמיקה הביולוגית.

מוגנים בקשקשים (בעיקר דגי קרקעית) ואחריהם (בריכוז של 0.5PPM), דגים עם קשקשים. אתר המטרה המרכזי של נחושת הוא הזימים, שם היא מעכבת את האנזים $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ האחראי על ויסות מלחים, ובכך גורמת לכשל אוסמוטי ופגיעה בנשימה. בצמחים, עודף נחושת מצטבר בשורשים ומעכב את חלוקת התאים, בעוד שבנצר היא פוגעת במנגנון הפוטוסינתזה על ידי עיכוב ייצור הכלורופיל (Chlorophyll) ושיבוש ספיגת מיקרו-נוטריאנטים חיוניים כמו ברזל ואבץ. מקובל לחשוב שסף הרעילות של צמחי מים נמצא ב 0.5-1PPM.

יש לשים לב כי הטווחים המתוארים כאן הם עבור סף רעילות. סף ההשפעה השלילי הוא משמעותית נמוך יותר. למשל בדגים, חשיפה ממושכת לריכוזים נמוכים מאוד של נחושת (מתחת ל 0.05PPM), אינה הורגת באופן מיידי את הדג, אך גורמת לו לפגיעה בחוש הריח והניווט. כיוון שדגים מסתמכים על ריח כדי למצוא מזון, לזהות בני זוג ולהתחמק

ביבליוגרפיה

1. **Boyd, C. E. (2015).** *Water quality: An introduction* (2nd ed.). Springer.
2. **Grosell, M., Blanchard, J., Kwass, S. T., & Lehr, R. P. (2007).** Effects of interactions between waterborne Mg and Ca on the toxicity of Cu and Ni to *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology*, *84*(2), 162–172.
3. **Handy, R. D. (2003).** Chronic effects of copper exposure in fish: Species differences, cellular mechanisms, and alternatives to whole-animal toxicity testing. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, *135*(1), 25–38.
4. **Niyogi, S., & Wood, C. M. (2004).** Biotic ligand model, a flexible tool for predicting the acute toxicity of metals to aquatic organisms. *Environmental Science & Technology*, *38*(23), 6177–6192.

5. **Playle, R. C. (1998).** Using metal-gill binding models to predict the bioavailability and toxicity of metals in natural waters. *Science of the Total Environment*, 219(2-3), 147–163.
6. **Herzog, G., (2018).** [מי מזגנים ומי גשמים, מים אידאליים למילוי האקווריום ובריכת](#) www.snapirim-fish.com סנפירים - חוות גידול דגי נוי. אוחזר מתוך [הנני](#).