

# Nitric oxide -NO

NO הוא חומר במצב של גז , בעל השפעות פיזיולוגיות ופתולוגיות רבות אצל בעלי חיים וצמחים (1). NO קיבל את ההכרה של עולם המדע בשנת 1992, וכינו אותו המולקולה של השנה (2). כמה שנים אחר כך, ב-1998, קבלו 3 מדענים פרס נובל על הגילוי ש-NO הוא מולקולת איתות במערכת הקרדיו-וסקולרית. המדענים הם: R. Furchgott ו-L. Ignarro ו-F. Murad (3).

NO נוצר בצמחים בכמה אופנים:

בדרך אנזימטית, על ידי האנזים NO Synthetase- NOS מניטריטים. הראו ייצור NO מניטריטים ב- Glycine max –סויה, בחמניות- *Helianthus annuus* ובאצות ירוקיות

בצמחים רבים מיוצר NO מניטרט באמצעות האנזים nitrate reductase, ואח"כ הפיכת הניטרט לניטריט ע"י האנזים nitrite reductase (1). אנזים זה מצוי בחלקים שונים של תאי הצמח, כגון, בממברנות, במיטוכונדריה, בציטוזול.

NO הוא רדיקל חופשי, והוא עובר מטבוליזם או מורחק בדרך אחרת במהירות רבה, מיד לאחר שסיים את פעילותו. הוא אינו יציב. הוא מתחבר עם חמצן ויוצר ניטריט או ניטרט.

NO מתפקד בצמח כמולקולת איתות אנדוגנית  
המתווכת בתהליכים פיזיולוגיים, כגון, הגנה מפני  
פתוגנים, פריחה ומוות מתוכנן.  
ייצור של קסילים- תעלות בהן זורמים הנוזלים בתוך  
הצמח ומתפתחות בהן דפנות מליגנין.  
וויסות של סגירת הפיוניות בתנאים של יובש-  
הכוונה של צמיחת חלקי הצמח בהתאם לכוח  
המשיכה. יכל להיות gravitropism חיובי או  
שלילי. השורש צומח לפי גרביטרופיזם חיובי ואילו  
הגבעול צומח לפי גרביטרופיזם שלילי.

במצבים מסוימים משתחרר NO בריכוזים גבוהים בהרבה מזה שנדרש לקיום ההשפעות הביולוגיות שלו. בריכוזים נמוכים הוא מעודד צמיחה, בריכוזים גבוהים הוא מעכב צמיחה ויש בו רעילות (4) לא מצאו קולטן בצמח הקושר NO ולא ידוע המנגנון המדויק לפיו המולקולה משפיעה על הצמח. יתכן שיש כמה מנגנונים הקשורים למיקום התוך-תאי, ולמרכיבים המצויים בסביבה. NO יכול להתקשר לקבוצות SH של תיול או גלוטטיון, להתחבר למתכות או לחלבונים (1).

## תנועת NO בצמח

NO יכל לנוע בתוך התא ממקום של סינתיזה לאזורים אחרים בהם הוא יכל לעורר פעילות על ידי התחברות לחלבונים מסוימים.

הוא יכל לנוע אל מחוץ לתא כשהוא עובר דרך הממברנה הפלסמטית, להכנס לתאים שכנים, ולארגן בסביבה קבוצה של תאים המגיבים ל-NO. מכיוון שהוא ליפופילי הוא יכל להצטבר בתוך הממברנה של התא וגם לנוע דרכה מבלי שהיא תחסום אותו (5).

## השפעה של NO על גנים

הראו השפעה של NO על כמה גנים בצמח *Arabidopsis thaliana*.

השפעה על גנים אינה מתבטאת בשינויים מטבוליים מיידיים, אבל התוצאה הסופית היא תגובה פיזיולוגית של התא. המחקרים הראו ש-NO מעורב בכל תגובה שקשורה למצבי עקה בצמח (1).

## NO ופציעה של הצמח

כשפצעו את האפידרמיס של *Arabidopsis* התקבלה התפרצות של NO בתוך דקות, שבעקבותיה התחילו לפעול כמה אנזימים (6).

## תגובה של צמחים לזיהום עם פתוגנים.

צמחים מגיבים לזיהום על ידי פתוגנים בכך שהם מעוררים תגובה מקומית ומערכתית.

התגובה המקומית מאופיינת על ידי התפתחות של פצעים כתוצאה של מוות מתוכנן של תאים, או אפופטוזיס המגביל גידול או פיזור של הפתוגן (7).

ההשפעה על ביטוי הגן מתבטאת בשחרור של אנזימים הפועלים נגד מיקרואורגניזמים, ובייצור מטבוליטים מישניים, כגון, פיטואלקסינים שהורגים את הפתוגנים (1).

NO משתתף במקרים אלה בכך שהוא מעורר את ביטוי הגנים.

## הגנה בכלורופלסטים

NO מגן על הכלורופלסטים מפני הרס על ידי קרניים אולטרה סגוליות. הראו הגנה על כלורופלסטים בעלים של שעועית, על ידי הגברה של פעילות של אנזימים אנטי אוקסידנטים כגון-superoxide, dismutase, ascorbate peroxidases - catalases.

## השפעה על רביית הצמחים.

NO מווסת תהליכי רבייה בצמח. הראו ש-Arabidopsis שטופלו עם NO פרחו מוקדם יותר מאשר צמחי הבר (8). מחקרים אחרים הראו ויסות של צמיחת מאבקים והתחלה של תרדמת זרעים (1).



מחקרים נוספים המתפרסמים בשנים האחרונות מראים פעילויות נוספות המווסתות על ידי NO. המחקר הראשון התפרסם בשנת 1996 (9). הוא הראה ש-NO- משפיע על צמיחה של עלים, שורשים וכן על ייצור של פיטואלקסינים (9).

עבודות אחרות הראו ויסות של צמיחה של נצרים, של חלוקת תאים, ייצור של קסילים, יחסי גומלין עם חיידקים קושרי חנקן, סגירה של הפיוניות והתפתחות של שורשים (1).

לסיכום, הידע שהצטבר בשנים האחרונות על המיקום והפעילות של NO מראה שזוהי מולקולה בעלת פעילות מגוונת מאד, שעוברת בקלות לכל מקום על פני התא הצמחי, ומשפיעה על תהליכים רבים דרך איתות המעיר אנזימים ומרכיבים רבים לפעולה (1).

1. Misra AN. Misra M. and Singh R. Nitric oxide biochemistry, mode of action and signaling in plants. *J. Medicinal Plants Research*, 2010, 4: 2729-2739.
2. Koshland JDE. The Molecule of the Year. *Sci.* 1992, 258: 1861.
3. Lamattina L. Garcia-Mata C. Graziano M. et al. Nitric oxide: the versatility of an extensive signal molecule. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2003, 54: 109-136.
4. Beligni MV. Lamattina L. Is nitric oxide toxic or protective? *Trends in Plant Sci.* 1999, 4; 299-306.
5. Liu X. Miller MJS. Joshi MS. et al. Accelerated reaction of nitric oxide with O<sub>2</sub> within the hydrophobic interior of biological membranes. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1998, 95: 2175-2179.
6. Huang X. Steittmaier K. Michel C. et al. Nitric oxide is induced by wounding and influences jasmonic acid signaling in *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, 2004, 218: 938-952.
7. Krause M. Dumer J. Harpin inactivates mitochondria in *Arabidopsis* suspension cells. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 2004, 17: 131-139.
8. Guo FQ. Okamoto M. Crawford NM. Identification of a plant nitric oxide synthase gene involved in hormonal signaling. *Science*, 302:100-103.
9. Leshem YY. Nitric oxide in biological systems. *Plant Growth Regulat.* 1996, 18: 155-159.