مجله تحقیقات آب و خاک ایران (41) 2، 1389 (295-283)

تأثیر pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب آهن، روی، مس و منگنز بوسیله اسفناج در کشت هیدروپونیک

نصرت اله نجفی[1]*، منصور پارسازاده[2]، سید جلال طباطبایی[3] و شاهین اوستان[4]

[1] استادیار، [2]دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، [3]استاد و [4]استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: 1388/6/1- تاریخ تصویب: 1389/3/22)

چکیده

برای بررسی تأثیر pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر جذب و غلظت Fe، Mn، Zn و Cu ریشهها و بخش هوایی اسفناج، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور شامل pH محلول غذایی در سه سطح 4/5، 6/5، 8 و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی در پنج سطح 100:0، 75:25، 50:50، 25:75، 0:100 و با 4 تکرار در بستر پرلیت انجام شد. نتایج نشان داد که تأثیر pH محلول غذایی بر غلظت Fe و Cu ریشهها و غلظت Mn، Fe و Cu بخش هوایی و جذب Fe، Cu و Mn معنیدار بود ولی بر غلظت Zn ریشهها و بخش هوایی و جذب Zn معنیدار نبود. با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 8، جذب Fe، Cu و Mn و غلظت Fe، Cu و Mn بخش هوایی کاهش ولی غلظت Fe و Cu ریشهها افزایش یافت. این در حالی است که جذب Zn، غلظت Zn و Mn ریشهها و غلظت Zn بخش هوایی تغییر معنیداری نکرد. تأثیر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر جذب و غلظت Fe، Mn و Zn ریشه-ها و بخش هوایی و جذب و غلظت Cu بخش هوایی اسفناج معنیدار بود ولی بر غلظت Cu ریشهها معنیدار نبود. با افزایش آمونیوم محلول غذایی جذب و غلظت Fe، Mn، Zn و Cu ریشهها و بخش هوایی اسفناج افزایش یافت ولی با افزایش بیشتر غلظت آمونیوم، جذب Fe، Mn، Cu و Zn، غلظت Mn و Cu ریشهها و غلظت Fe و Mn بخش هوایی دوباره کاهش یافت. همچنین، تأثیر شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب و غلظت Fe، Mn، Cu و Zn ریشهها و بخش هوایی اسفناج به pH محلول غذایی بستگی داشت و برعکس. به طور کلی، بیشترین مقدار جذب Fe و Zn بوسیله اسفناج در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و pH 6/5 ولی بیشترین مقدار جذب Mn و Cu بوسیله اسفناج در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و pH 4/5 بود. گیاه اسفناج Mn و Zn را در بخش هوایی در حالی که Fe و Cu را در ریشهها انباشته کرد.

واژه های کلیدی: اسفناج، نسبت نیترات به آمونیوم، pH، محلول غذایی، آهن، منگنز، روی، مس.

مقدمه

چهار عنصر Fe، Mn، Zn و Cu از عناصر کممصرف ضروری برای تغذیه و رشد گیاهان، حیوانات و انسان محسوب میشوند و وجود غلظتهای مناسبی از این عناصر در بافتهای گیاهان نه تنها برای رشد و عملکرد مطلوب گیاهان بلکه در زنجیره غذایی برای رشد و سلامتی حیوانات و انسان ضروری است (Berdanier and Atkins, 1998; Fageria et al. 2002; Havlin et al. 2004; Marschener, 1995; Welch, 2002). در سالهای اخیر بروز کمبودهای عناصر کممصرف در گیاهان زراعی مختلف به دلیل کشت متراکم، فرسایش خاک سطحی، آبشویی، کاهش مصرف کودهای آلی نسبت به کودهای شیمیایی، استفاده از کودهای شیمیایی با درصد خلوص زیاد، به زیرکشت بردن خاکهای فقیر، pH زیاد، آهکی بودن خاکها و کیفیت نامناسب آب آبیاری گسترش داشته است (Fageria et al. 2002; Havlin et al. 2004) که سبب گسترش کمبودهای عناصر غذایی کممصرف در حیوانات و انسان شده است. به طوری که، در حدود 50٪ مردم جهان از کمبودهای عناصر کممصرف رنج میبرند (Cakmak, 2002). بهترین روش جلوگیری از بروز کمبودهای عناصر غذایی، مصرف مواد غذایی حاوی مقادیر کافی از این عناصر در یک رژیم غذایی متعادل میباشد. در این راستا، افزایش تولید مواد غذایی و افزایش غلظت عناصر غذایی در مواد غذایی مصرفی انسانها و دامها اهمیت ویژهای دارد (Lindsay et al. 2006; Welch, 2002).

با توجه به محدودیت کمی و کیفی منابع آب و خاک و لزوم تأمین مواد غذایی برای جمعیت رو به رشد کشور، امروزه به تولید محصولات کشاورزی در نظامهای کشت بدون خاک یا هیدروپونیک توجه ویژهای شده است. در کشت هیدروپونیک، pH و شکل نیتروژن محلول غذایی از عاملهای مهمیاند که بر

* پست الکترونیک مکاتبه کننده: n-najafi@tabrizu.ac.ir

رشد گیاهان و غلظت عناصر در آنها مؤثرند. pH محلول غذایی بر انحلال، شکل یونی و تحرک عناصر کممصرف و در نتیجه بر مقدار جذب و قابلیت جذب آنها برای گیاه تأثیر دارد. از طرف دیگر، pH از طریق اثر یونهای H^+ و OH^- بر ریشه گیاه به ویژه غشای سلولهای انتقال دهنده یون بر جذب یونها اثر میگذارد (Epstein and Bloom, 2005; Fageria et al. 2005; Marschener, 1995). Savvas et al. (2003) گزارش دادند که با افزایش pH محلول غذایی و پیرامون ریشهها جذب Mn، Cu و Zn بوسیله گیاهان مورد مطالعه کاهش مییابد.

شکل نیتروژن کاربردی بر جذب سایر کاتیونها و آنیونها بوسیله ریشه گیاه و در نتیجه بر ترکیب شیمیایی بافتهای گیاه و غلظت عناصر غذایی در آنها تأثیر معنیدار دارد (Assimakopoulou, 2006; Serna et al. 1992)؛ زیرا، میان عناصر موجود در گیاه که به صورت کود به بستر رشد گیاه افزوده میشوند، نیتروژن بیشترین غلظت را داشته و عمدتاً به دو شکل نیترات و آمونیوم بوسیله ریشه گیاه جذب میشود (Marschener, 1995). شکل نیتروژن کاربردی با جذب عناصر غذایی به طور مستقیم یا غیرمستقیم برهمکنش دارد. برای مثال، مشاهده شده است که افزایش آمونیوم محلول غذایی سبب افزایش جذب فسفر و القای کمبود Fe در گیاه اسفناج میشود (Assimakopoulou, 2006). تغذیه گیاهان با نسبتهای مختلف نیترات به آمونیم بو جنبههای مختلف فیزیولوژی آنها اعم از شاخص‌های کمی و کیفی تأثیر میگذارد و یافتن ن سبت مناسب نیتروژن آمونیومی و نیتراتی در تغذیه گیاهان مختلف ضروری است (Marschener, 1995). با این حال، بررسیها نشان میدهد که تأثیر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر جذب و غلظت عناصر کممصرف در گیاهان مختلف و در شرایط مختلف آزمایش متفاوت است. Kim et al. (2002) گزارش کردند که با افزایش غلظت آمونیوم محلول غذایی غلظت Mn در برگهای درخت هلو کاهش مییابد. Serna et al. (1992) مشاهده کردند که با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی غلظت Fe و Cu در برگهای مرکبات افزایش و غلظت Zn و Mn کاهش مییابد. Clark et al. (2003) گزارش دادند که با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Fe، Mn، Zn و Cu بخش هوایی دو رقم آزالیه افزایش مییابد. Elia et al. (1996) مشاهده کردند که با افزایش نیترات محلول غذایی غلظت کاتیونهای معدنی در بخش هوایی گیاهان مورد مطالعه افزایش مییابد. Kotsiras et al. (2002) مشاهده کردند که با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Mn میوههای خیار کاهش ولی غلظت Cu آنها افزایش مییابد در حالی که غلظت Fe و Zn تغییر معنیداری نمیکند. به نظر میرسد میان pH و نیتروژن از نظر تأثیر بر جذب و غلظت عناصر کممصرف در گیاه برهمکنش وجود دارد. به عبارت دیگر، اثر pH بر جذب عناصر بسته به شکل نیتروژن کاربردی (آمونیوم یا نیترات) متفاوت است (Zhang et al. 2005). به همین ترتیب، چگونگی اثر غلظت و شکل کود نیتروژن بر جذب و غلظت سایر یونها در گیاه با تغییر pH بستر رشد تغییر میکند (Marschener, 1995). Savvas et al. (2003) گزارش دادند که با کاربرد نسبت نیترات به آمونیوم مناسب میتوان اثر مضر pH زیاد بر جذب عناصر کممصرف بوسیله گیاه را کاهش داد.

اسفناج از مهمترین سبزیهای برگی است که غنی از عناصر غذایی مختلف بوده و اهمیت مواد غذایی موجود در آن در سلامتی بشر به خوبی روشن شده است (Welch, 2002). این گیاه بومی ایران بوده و در نقاط مختلف کشور کشت میشود. مصرف اسفناج در غذاهای ایرانی زیاد است. با توجه به مطالب مذکور، این تحقیق برای بررسی اثر pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و برهمکنش آنها بر جذب و غلظت عناصر Fe، Mn، Zn و Cu ریشهها و اندامهای هوایی اسفناج در کشت هیدروپونیک انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی هیدروپونیک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در تابستان 1386 انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور شامل pH محلول غذایی در سه سطح (4/5، 6/5، 8) و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی در پنج سطح (100:0، 75:25، 50:50، 25:75، 0:100) و با چهار تکرار انجام شد. در این آزمایش از گلدانهای پلاستیکی هفت لیتری به ابعاد (ارتفاع25cm×قطر32cm) استفاده شد. جهت ایجاد تهویه و جلوگیری از خروج پرلیت، در کف گلدانها یک لایه شن درشت به جرم 500 گرم ریخته شد. سپس به هر یک از گلدانها 900 گرم پرلیت دانه متوسط با قطر حدود دو میلیمتر افزوده شد. محلول غذایی پایه، "هوگلند تغییر یافته" بود که غلظت عناصر در آن شامل: نیتروژن 180، فسفر 38، پتاسیم 204، کلسیم 161، منیزیم 58، بور 0/5، مس 0/02، آهن 3، منگنز 0/5، مولیبدن 0/01 و روی 0/05 میلیگرم در لیتر بود (Hoagland and Arnon, 1950). ابتدا محلولهای غذایی با پنج نسبت نیترات به آمونیوم 100:0، 75:25، 50:50، 25:75 و 0:100 در تانکهای 200 لیتری تهیه گردید. سپس محلول داخل تانکها هر کدام به سه قسمت تقسیم شد و pH آنها با افزودن 0.1M

HCl و 0.1M NaOH، در 4/5، 6/5 و 8 تنظیم گردید (Zhang et al. 2005). برای تأمین عناصر غذایی پرمصرف و کممصرف، از منابع کودی KNO_3، $Ca(NO_3)_2.4H_2O$، $MgSO_4.7H_2O$، KH_2PO_4، K_2SO_4، $Mg(NO_3)_2.6H_2O$، $(NH_4)_2SO_4$، $ZnSO_4.7H_2O$، $CaCl_2.2H_2O$، Fe-EDDHA، Mn-EDTA، $CuSO_4.5H_2O$، H_3BO_3، NH_4Cl، $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ استفاده شد. در ضمن آب مصرفی در گلخانه در آزمایشگاه تجزیه شد (Gupta, 2000) و هنگام تهیه محلولهای غذایی عناصر موجود در آب گلخانه نیز در نظر گرفته شد (جدول 1). گیاهان در طول دوره رشد، هر روز با محلولهای غذایی به صورت دستی آبیاری شدند.

جدول 1- نتایج تجزیه شیمیایی آب گلخانه

عناصر	K	P	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cl^-	HCO^-_3	pH	EC (dS/m)
غلظت (mg/L)	4/3	0/05	35	42	11	0/1	0	1	0	20	87	7/7	0/49

بذور گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) هیبرید F1 رقم سیریوس در خزانه کشت و از زمان کشت بذور تا یک هفته پس از جوانهزدن رطوبت مورد نیاز از طریق آبیاری با آب معمولی (آب شهر) تأمین شد. سپس نشاها به بستر رشد (گلدانها) منتقل گردید. سه نشای گیاه اسفناج در هر گلدان کشت و به مدت دو هفته با استفاده از یک دوم غلظت محلول غذایی "هوگلند تغییر یافته" با pH 6/5 و نیترات خالص محلول-دهی شدند تا گیاهان به طور کامل استقرار یابند. سپس به مدت پنج هفته با محلول غذایی کامل هر تیمار تغذیه شدند (Zhang et al. 2005). در طول دوره رشد، دمای گلخانه در روز 3±24 ºC و در شب 3±17 ºC و میانگین رطوبت نسبی گلخانه 55 درصد بود. پس از هفت هفته رشد، اندامهای هوایی گیاه از محل طوقه قطع شده و برداشت گردید و بلافاصله وزن تر آنها با استفاده از ترازوی دیجیتالی تعیین شد. سپس نمونههای مذکور در درون دستگاه خشککن نمونههای گیاهی با دمای 70ºC به مدت چهار روز نگهداری گردید تا خشک شدند و به کمک ترازوی دیجیتالی وزن خشک آنها نیز تعیین گردید. غلظت عناصر Fe، Mn، Zn و Cu ریشهها و اندامهای هوایی گیاهان به روش ترسوزانی و با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین گردید (Waling et al. 1989). مقادیر جذب عناصر Fe، Mn، Zn و Cu بوسیله گیاه از حاصلضرب غلظت عنصر در ماده خشک گیاه محاسبه گردید. فاکتور انتقال (Translocation Factor) از تقسیم غلظت فلز در بخش هوایی به غلظت فلز در ریشههای گیاه محاسبه شد. این فاکتور شاخصی است برای تعیین توانایی گیاه در انتقال فلزات از ریشهها به بخش هوایی. اگر این فاکتور بیش از یک باشد نشانگر این است که گیاه فلز را در بخش هوایی انباشته میکند ولی اگر این فاکتور کوچکتر از یک باشد نشان میدهد که گیاه فلز را بیشتر در ریشهها انباشته میکند و برای گیاهپالایی (Phytoremediation) به روش استخراج فلز از بستر رشد و پالایش بستر از آلودگی به فلز مذکور، مناسب نیست (Das and Maiti, 2007; Yoon et al. 2006). تجزیه و تحلیل آماری دادهها از قبیل آزمون نرمال بودن توزیع دادهها، تجزیه واریانس، مقایسه میانگینها و تجزیه رگرسیون با استفاده از نرمافزارهای MSTATC و SPSS انجام شد. مقایسه میانگین-ها با آزمون چند دامنهای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید و نمودارها با نرمافزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

غلظت Fe بخش هوایی: تجزیه واریانس (جدول2) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Fe بخش هوایی در سطح احتمال یک درصد معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از صفر به 75 درصد غلظت Fe افزایش و با افزایش بیشتر آمونیوم محلول غذایی غلظت Fe بخش هوایی کاهش مییابد. با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5، غلظت Fe بخش هوایی اسفناج تغییر معنیداری نمیکند ولی در pH 8 غلظت Fe بخش هوایی به طور معنیداری کاهش مییابد (جدول2). Mirsoleimani and Tafazoli (2006) نیز نتیجه مشابهی را در گیاه انگور گزارش دادهاند. این کاهش را میتوان به تشکیل رسوب $Fe(OH)_3$ و کاهش حلپذیری Fe در pH بالای محلول غذایی نسبت داد (Havlin et al. 2004). شکل 1 نشان میدهد که اثر pH بر غلظت Fe بخش هوایی اسفناج بسته به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی متفاوت است. به طوری که: 1) در نسبت نیترات به آمونیوم 100:0، غلظت Fe بخش هوایی با افزایش pH از 4/5 به 8 به طور معنیداری تغییر نمییابد؛ 2) در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25، غلظت Fe بخش هوایی بین دو pH 4/5 و 6/5 تفاوت معنیداری ندارد ولی در pH 8 به طور معنیداری کاهش مییابد؛ 3) در نسبت نیترات به آمونیوم 50:50 با افزایش pH از 4/5 به 6/5 غلظت Fe بخش هوایی به طور معنیداری کاهش مییابد ولی بین دو pH 6/5 و 8 تفاوت معنیداری وجود ندارد؛ 4) در نسبت نیترات به آمونیوم 25:75، با افزایش pH از 4/5 به 8 غلظت Fe بخش

هوایی به طور معنیداری کاهش میبابد ولی بین دو pH 6/5 و 8 تفاوت معنیداری وجود ندارد. 5) در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100، با افزایش pH از 4/5 به 6/5 غلظت Fe بخش هوایی به طور معنیداری تغییر نمیکند ولی در pH 8 به طور معنیداری افزایش میبابد. این افزایش غلظت Fe را میتوان به کاهش pH ریزوسفر گیاه اسفناج بر اثر تغذیه با آمونیوم خالص نسبت داد. به طوری که بررسی ما نشان داد (دادهها ارائه نشده است) که هنگام تغذیه با محلول غذایی حاوی نسبت نیترات به آمونیوم 0:100، pH ریزوسفر در سه pH 4/5، 6/5 و 8 به ترتیب حدود 4، 5 و 6/5 میباشد. به عبارت دیگر، با تغذیه آمونیومی pH ریزوسفر کاهش میبابد. در دو pH ریزوسفر 4 و 5، زیادی فعالیت پروتون میتواند جذب Fe توسط ریشه گیاه اسفناج را کاهش دهد. همچنین زیادی فعالیت پروتون (مخصوصاً در pH 4) میتواند به بافت ریشهها صدمه زده و رشد ریشهها و انجام فرآیندهای متابولیک در آنها را مختل نماید (Havlin et al. 2004; Marschener, 1995)؛ در نتیجه، سرعت جذب Fe توسط ریشهها کاهش میبابد. در حالی که در pH ریزوسفر حدود 6/5 (در محلول غذایی با pH 8) شرایط برای رشد ریشهها فراهم بوده (افزایش احتمالی حجم ریشهها در گلدان) و اثرات مضر زیادی پروتون هم وجود ندارد. در نتیجه، سرعت جذب و انتقال Fe بیشتر از دو pH دیگر بوده است و در نتیجه غلظت Fe بخش هوایی افزایش یافته است. نتایج نسبتاً مشابهی بوسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (Rothstein and Cregg, 2005; Savvas et al. 2003; Tang et al. 2006). Serna et al. (1992) مشاهده کردند که با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی، غلظت Fe برگهای مرکبات افزایش میبابد. در حالی که در بررسی دیگری مشاهده شده است که افزایش آمونیوم محلول غذایی سبب افزایش جذب فسفر و القای کمبود Fe در گیاه اسفناج میشود (Assimakopoulou, 2006). Islam et al. (1980) مشاهده کردند که با افزایش pH محلول غذایی از 3/3 به چهار، غلظت Fe بخش هوایی گندم کاهش ولی در سایر گونههای گیاهی مورد مطالعه افزایش میبابد و با افزایش pH از چهار به 8/5، غلظت Fe در گوجهفرنگی افزایش و در گونههای دیگر کاهش میبابد.

دامنه کفایت غلظت Fe بخش هوایی اسفناج 200-60 میلیگرم در کیلوگرم ماده خشک میباشد (Rosen and Eliason, 2005). بنابراین، با توجه به شکل 1 غلظت Fe بخش هوایی اسفناج در اکثر تیمارها در دامنه کفایت قرار میگیرد ولی در چهار تیمار (نیترات خالص در هر سه pH مورد مطالعه و نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 در pH 8) کمتر از دامنه کفایت میباشد. بررسی ما نشان داد که این چهار تیمار pH ریزوسفر بیشتری از سایر تیمارها دارند. pH بر حلپذیری Fe اثر قابل ملاحظهای دارد. به طوری که با افزایش یک واحد pH فعالیت Fe^{2+} 100 برابر و فعالیت Fe^{3+} 1000 برابر در محلول (خاک) کاهش می - یابد (Havlin et al. 2004). بنابراین، فعالیت Fe در محلول کاهش یافته و در نتیجه جذب Fe بوسیله ریشه گیاه کم شده و غلظت Fe بخش هوایی نیز کاهش میبابد.

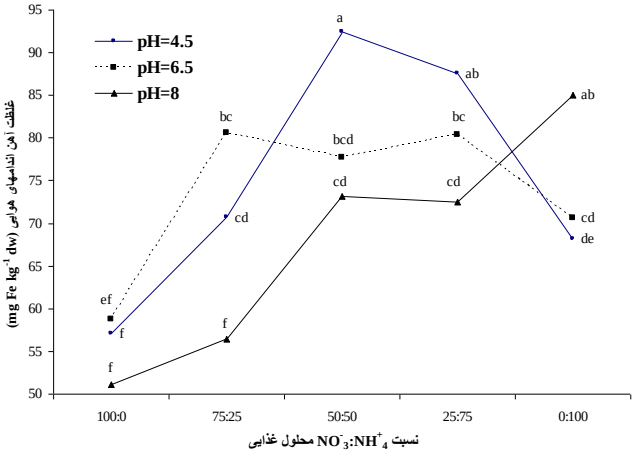
جدول 2- مقایسه میانگینهای [1] اثر pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب و غلظت Fe بخش هوایی و ریشههای اسفناج

اثر اصلی	سطوح	غلظت Fe بخش هوایی (mg kg^{-1} dw)	جذب Fe (mg pot^{-1})	غلظت Fe ریشهها (mg kg^{-1} dw)
نسبت نیترات به آمونیوم	100:0	55/7 d	1/8 c	122/2 d
	75:25	69/2 c	3/3 a	175/3 c
	50:50	81/1 a	2/9 b	286/4 b
	25:75	80/2 ab	1/7 c	328/4 a
	0:100	74/6 bc	0/8 d	322/4 a
pH محلول غذایی	4/5	75/2 a	2/3 a	236/1 b
	6/5	73/6 a	2/2 a	238/9 b
	8/0	67/7 b	1/8 b	256/9 a

منبع تغییر	سطح احتمال معنیداری		
pH	**	*	**
نسبت نیترات به آمونیوم	**	**	**
نسبت نیترات به آمونیوم × pH	**	**	**

1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.
* و ** به ترتیب معنیدار در سطح احتمال 5٪ و 1٪

جذب Fe: تجزیه واریانس (جدول 2) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر جذب Fe در سطح احتمال یک درصد معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از صفر به 25 درصد، جذب Fe بوسیله اسفناج افزایش و با افزایش بیشتر آمونیوم محلول غذایی کاهش مییابد. همچنین، با افزایش pH محلول غذایی جذب Fe به طور معنیداری کاهش مییابد (جدول2). این کاهش را میتوان به کاهش غلظت Fe بخش هوایی (جدول2) و کاهش ماده خشک بخش هوایی (جدول 3) مربوط دانست که در نتیجه حاصلضرب آنها یعنی مقدار جذب Fe نیز کاهش مییابد. بین مقدار جذب Fe و ماده خشک رابطه مستقیم با $r=0.953^{**}$ مشاهده گردید که نشان دهنده این است که بخش عمده تغییرات مقدار جذب Fe به تغییرات ماده خشک مربوط است. جدول 3 نشان میدهد که اثر pH محلول غذایی بر جذب Fe بوسیله اسفناج بسته به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی متفاوت است و برعکس. بیشترین مقدار جذب Fe در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و در pH 6/5 مشاهده می-شود که ناشی از زیاد بودن ماده خشک بخش هوایی در این تیمار میباشد. کمترین مقدار جذب Fe در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100 و در pHهای 4/5 و 6/5 و در نسبت نیترات به آمونیوم 100:0 و در pH 8 میباشد.



شکل 1- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Fe بخش هوایی اسفناج

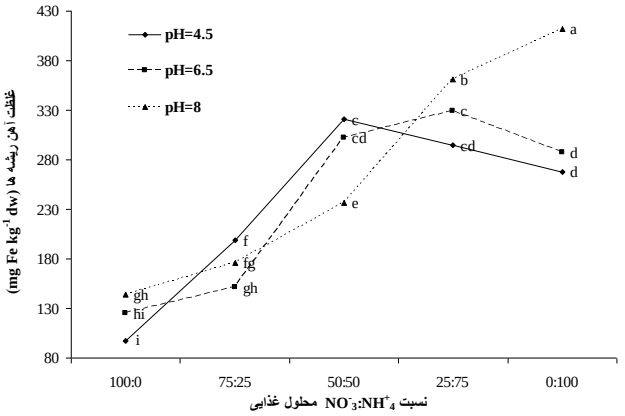
جدول 3- اثر متقابل pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر مقدار جذب Fe، Mn، Zn و Cu بوسیله اسفناج[1]

pH	نسبت نیترات به آمونیوم	ماده خشک بخش هوایی (g pot^{-1})	جذب Fe (mg pot^{-1})	جذب Mn (mg pot^{-1})	جذب Zn (mg pot^{-1})	جذب Cu (mg pot^{-1})
4/5	100:0	51/76a	2/79cde	0/97 g	5/40 efg	0/78 ef
	75:25	51/29 ab	3/42 b	6/0 a	10/69 b	1/27 a
	50:50	36/6 c	3/19 bc	4/98 b	8/78 bcd	1/05 bc
	25:75	19/38 ef	1/60 hi	2/54 de	4/56 fg	0/50 ghi
	0:100	9/50 fg	0/61 k	1/15 g	2/81 gh	0/31 j
6/5	100:0	38/86 bc	2/18 fg	0/38 h	3/25 g	0/66 fg
	75:25	51/70 ab	3/92 a	4/97 b	14/13 a	1/00 bcd
	50:50	32/84 cd	2/40 ef	4/36 c	7/70 cde	0/900 cde
	25:75	20/27 efg	1/53 hi	2/69 d	6/48 def	0/59 gh
	0:100	11/51 fg	0/77 jk	1/41g	3/23 g	0/37 ij
8/0	100:0	6/43 g	0/30 k	0/04 h	0/55 g	0/11 k
	75:25	50/33 ab	2/68 de	2/11 ef	6/75 def	0/78 ef
	50:50	44/83 abc	3/10 bcd	5/22 b	10/76 b	1/13 ab
	25:75	27/99 de	1/91 gh	4/24 c	9/51 bc	0/84 def
	0:100	14/33 fg	1/15 ij	1/93 f	6/24 def	0/42 hij

1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.

غلظت Fe ریشهها: تجزیه واریانس (جدول 2) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر غلظت Fe ریشهها معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Fe ریشهها افزایش مییابد که با نتایج Stratton et al. (2001) مطابقت دارد. با این حال، شکل 2 نشان میدهد که اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Fe ریشهها بسته به pH محلول غذایی متفاوت است. در pH 8، با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Fe ریشهها افزایش مییابد ولی در دو pH 4/5 و 6/5، با افزایش آمونیوم

محلول غذایی غلظت Fe ریشهها ابتدا افزایش یافته و مجدداً (در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100) کاهش میابد. هر چند جدول2 نشان میدهد که با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5 غلظت Fe ریشهها افزایش میابد و میان دو pH 6/5 و 8/0 تفاوت وجود ندارد، شکل 2 نشان میدهد که تأثیر pH محلول غذایی بر غلظت Fe ریشهها بسته به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی متفاوت است. به طوری که در نسبت نیترات به آمونیوم 50:50 با افزایش pH محلول غذایی غلظت Fe ریشهها به طور معنیداری کاهش میابد. Mirsoleimani and Tafazoli (2006) نیز نتیجه مشابهی را در گیاه انگور گزارش دادهاند. با مقایسه غلظت Fe بخش هوایی و ریشهها مشاهده میشود که میانگین غلظت Fe ریشهها حدود سه برابر میانگین غلظت Fe بخش هوایی میباشد. بین غلظت Fe ریشهها و غلظت Fe بخش هوایی رابطه Fe Shoot= 0.0938(Fe Root) +48.985 با r=0.722** وجود دارد که نشان دهنده این است که با افزایش غلظت Fe ریشهها، غلظت Fe بخش هوایی نیز افزایش میابد. بنابراین، دلایلی که برای تغییرات غلظت Fe بخش هوایی ذکر شد، میتواند برای تغییرات غلظت Fe ریشهها هم صادق باشد.



شکل 2- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Fe ریشههای اسفناج

غلظت Mn بخش هوایی: تجزیه واریانس (جدول 4) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر غلظت Mn بخش هوایی در سطح احتمال یک درصد معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی از 100:0 به 25:75، غلظت Mn بخش هوایی به طور معنیداری افزایش میابد. با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی از 25:75 به 0:100، غلظت Mn بخش هوایی به طور معنیداری کم میشود. با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5 غلظت Mn بخش هوایی به طور معنی - داری تغییر نمیکند و با افزایش pH محلول غذایی از 6/5 به 8 غلظت Mn بخش هوایی به طور معنیداری کاهش میابد (جدول 4). شکل 3 نشان میدهد که تأثیر pH محلول غذایی بر غلظت Mn بخش هوایی فقط در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 معنیدار است. در این نسبت، با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5 و از 6/5 به 8، غلظت Mn بخش هوایی به طور معنیداری کاهش میابد. کاهش غلظت Mn بخش هوایی با افزایش pH محلول غذایی را میتوان به افزایش pH رایزوسفر نسبت داد. زیرا، با افزایش pH حلپذیری Mn در محلول پیرامون ریشهها کاهش میابد. Islam et al. (1980) مشاهده کردند که با افزایش pH محلول غذایی با نیترات خالص از 5/5 به 8/5، غلظت Mn بخش هوایی گیاه کاساوا افزایش میابد. آنان این افزایش غلظت Mn را به کاهش رشد گیاه در pH 8/5 و اثر غلظت نسبت دادند.

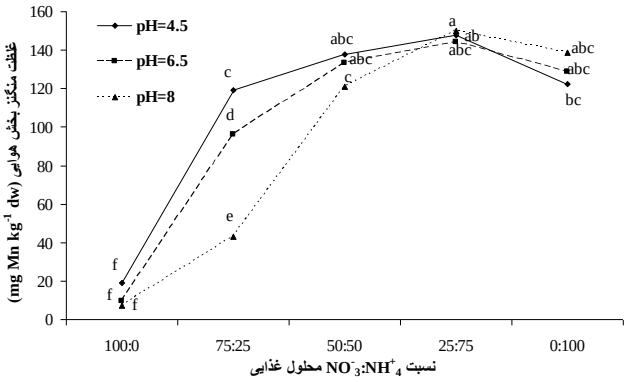
جدول 4- مقایسه میانگینهای [1] اثر pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب و غلظت Mn بخش هوایی و ریشههای اسفناج

اثر اصلی	سطوح	غلظت Mn بخش هوایی (mg kg^{-1} dw)	جذب Mn (mg pot^{-1})	غلظت Mn ریشهها (mg kg^{-1} dw)
نسبت نیترات به آمونیوم	100:0	11/95 d	0/46 e	25/70 d
	75:25	86/09 c	4/35 b	36/68 c
	50:50	130/70 b	4/85 a	46/60 a
	25:75	147/30 a	3/15 c	40/83 b
	0:100	129/90 b	1/49 d	44/24 ab
pH محلول غذایی	4/5	109/20 a	3/12 a	38/15 a
	6/5	102/40 a	2/76 b	38/36 a
	8/0	91/97 b	2/70 b	39/30 a
منبع تغییر		سطح احتمال معنیداری		
pH		**	**	ns

نسبت نیترات به آمونیوم	**	**	**
نسبت نیترات به آمونیوم×pH	**	**	**

1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.
ns و ** به ترتیب غیرمعنیدار و معنیدار در سطح احتمال 1٪

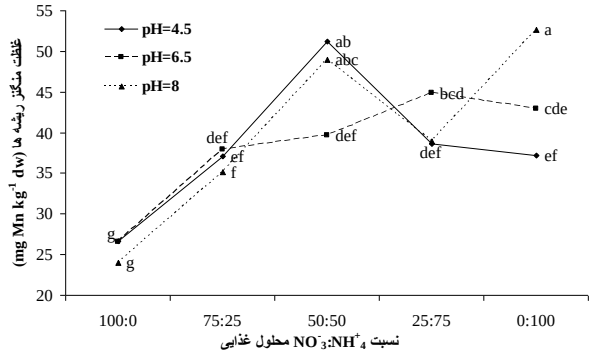
به طور کلی، با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Mn بخش هوایی افزایش یافته، سپس تغییر معنیداری نمیکند. تیمارهای با نیترات خالص (نسبت نیترات به آمونیوم 100:0) کمترین غلظت Mn بخش هوایی را دارند (شکل 3). نتایج گزارش شده بوسیله برخی محققان (Hamlin and Barker, 1992; Serna et al. 2002; Kim et al. 2006) با تحقیق حاضر متفاوت است. آنان بیان کردند که افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Mn را کاهش میدهد و این کاهش را به افزایش ماده خشک و اثر رقت نسبت دادند. به نظر میرسد که این تفاوتها ناشی از نوع گونه گیاهی، pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و شرایط متفاوت آزمایش میباشد. دامنه کفایت غلظت Mn بخش هوایی اسفناج 250-30 میلیگرم در کیلوگرم ماده خشک میباشد (Rosen and Eliason, 2005). با توجه به شکل 3 غلظت Mn در تیمارهای نیترات خالص کمتر از دامنه کفایت میباشد و در بقیه تیمارها غلظت Mn در حدود دامنه کفایت میباشد.



شکل 3- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Mn بخش هوایی اسفناج

جذب Mn: تجزیه واریانس (جدول 4) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر جذب Mn بوسیله اسفناج معنی-دار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از صفر به 50 درصد جذب Mn افزایش میبابد و با افزایش بیشتر آمونیوم جذب Mn به طور معنیداری کاهش میبابد (جدول 4). Kim et al. (2002) نیز مشاهده کردند که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از 25 به 75 درصد در pH 6/5، جذب Mn بوسیله گیاه هلو به طور معنیداری کاهش میبابد. با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5، جذب Mn به طور معنیداری کاهش میبابد و تفاوت معنیداری بین مقدار جذب Mn در دو pH 6/5 و 8 وجود ندارد (جدول 4). Savvas et al. (2003) نیز گزارش دادند که با افزایش pH محلول غذایی جذب Mn کاهش میبابد. جدول 3 نشان میدهد که کمترین مقدار جذب Mn در در محلول غذایی با نسبت نیترات به آمونیوم 100:0 و pH 8 میباشد هر چند که تفاوت معنیداری با pH 6/5 ندارد. همانطور که در جدول 3 مشاهده میشود کمتر بودن جذب Mn در این تیمار ناشی از کمتر بودن ماده خشک گیاه میباشد.

غلظت Mn ریشهها: تجزیه واریانس (جدول 4) نشان میدهد که اثر pH بر غلظت Mn ریشهها معنیدار نیست ولی اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر غلظت Mn ریشهها معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی غلظت Mn ریشهها افزایش میبابد (جدول 4) که با نتایج سایر محققان (Stratton et al. 2001) مطابقت دارد. هر چند اثر pH بر غلظت Mn ریشهها معنیدار نیست (جدول 4) ولی شکل 4 نشان میدهد که تأثیر pH بر غلظت Mn ریشهها به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بستگی دارد. به طوری که در نسبت نیترات به آمونیوم 50:50 بیشترین غلظت Mn ریشهها در pH 4/5 در حالی که در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100 در pH 8 مشاهده میشود. میان غلظت Mn ریشهها و غلظت Mn بخش هوایی رابطه Mn shoot = 5.0472 (Mn root) - 94.698 با $r=0.82^{**}$ وجود دارد.



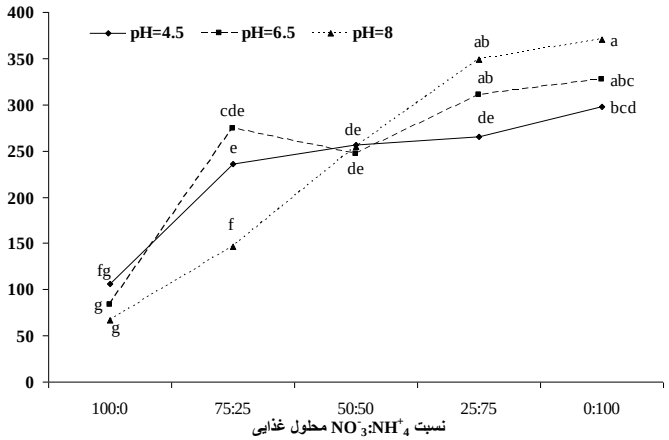
شکل 4- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Mn ریشههای اسفناج

غلظت Zn بخش هوایی: با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول 5)، اثر pH بر غلظت Zn بخش هوایی معنیدار نیست ولی اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Zn بخش هوایی افزایش مییابد (جدول 5). نتایج برخی محققان با این نتیجه متفاوت است. به طوری که، Serna et al. (1992) و Hamlin and Barker (2006) مشاهده کردند که با افزایش آمونیوم محلول غذایی، غلظت Zn بخش هوایی گیاهان مورد مطالعه کاهش مییابد. Kim et al. (2002) مشاهده کردند که افزایش آمونیوم محلول غذایی، بر غلظت Zn بخش هوایی گیاه هلو تأثیری ندارد. هر چند که اثر pH بر غلظت Zn بخش هوایی معنیدار نیست (جدول 5)، اما شکل 5 نشان میدهد که در نسبت نیترات به آمونیوم 100:0 و 75:25 با افزایش pH از 4/5 به 8 غلظت Zn بخش هوایی کاهش مییابد که با نتایج سایر محققان (Kane et al. 2006) مطابقت دارد. در نسبتهای نیترات به آمونیوم 100:0 و 50:50 تفاوت معنیداری بین pHها از نظر غلظت Zn بخش هوایی وجود ندارد و در نسبت های نیترات به آمونیوم 25:75 و 0:100 با افزایش pH از 4/5 به 8 غلظت Zn بخش هوایی به طور معنیداری افزایش مییابد که با نتایج Islam et al. (1980) مطابقت دارد. افزایش غلظت Zn بخش هوایی میتواند به علت کاهش pH رایزوسفر بر اثر مصرف آمونیوم باشد. همانطور که در شکل 5 مشاهده میشود تیمارهای نیترات خالص کمترین غلظت Zn را دارند؛ زیرا pH ریزوسفر این تیمارها بیشتر از بقیه تیمارها میباشد (دادهها ارائه نشده است). دامنه کفایت غلظت Zn بخش هوایی اسفناج 25–100 میلیگرم بر کیلوگرم ماده خشک میباشد (Rosen and Eliason, 2005). با توجه به شکل 5، تیمارهای نیترات خالص در دامنه کفایت قرار میگیرند و غلظت Zn بخش هوایی تیمارهای دیگر بیش از دامنه کفایت میباشند. به عبارت دیگر، شکل 5 نشان میدهد که اگر در محلول غذایی از نسبت نیترات به آمونیوم پایینتر استفاده شود، میتوان غلظت Zn محلول غذایی را کاهش داد.

جدول 5- مقایسه میانگینهای [1] اثر pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب و غلظت Zn بخش هوایی و ریشههای اسفناج

اثر اصلی	سطوح	غلظت Zn بخش هوایی ($mg\ kg^{-1}$ dw)	جذب Zn ($mg\ pot^{-1}$)	غلظت Zn ریشهها ($mg\ kg^{-1}$ dw)
نسبت نیترات به آمونیوم	100:0	85/38 d	3/064 d	89/06 c
	75:25	218/8 c	10/52 a	150/60 b
	50:50	252/50 b	9/08 b	148/70 b
	25:75	318/90 a	6/85 c	235/80 a
	0:100	332/00 a	4/09 d	249/50 a
pH محلول غذایی	4/5	232/40 a	6/44 a	177/40 a
	6/5	254/60 a	6/96 a	170/50 a
	8/0	237/50 a	6/76 a	176/40 a
منبع تغییر		سطح احتمال معنیداری		
pH		ns	ns	ns
نسبت نیترات به آمونیوم		*	**	**
نسبت نیترات به آمونیوم×pH		**	**	ns

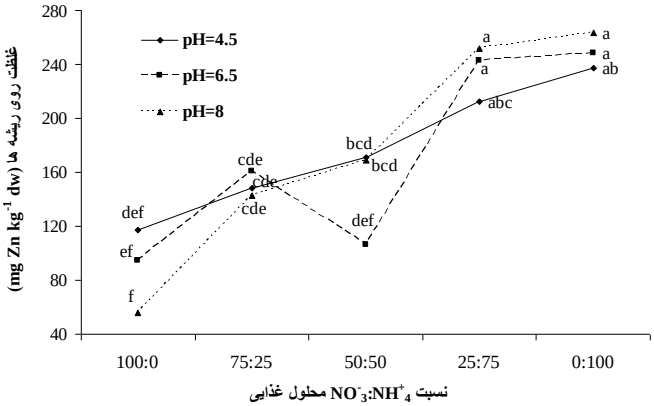
1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.
ns، * و ** به ترتیب غیرمعنیدار و معنیدار در سطح احتمال 5٪ و 1٪



شکل 5- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Zn بخش هوایی اسفناج

جذب Zn: با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول 5)، اثر pH بر جذب Zn بوسیله اسفناج معنیدار نیست ولی اثر نسبت نیترات به آمونیوم و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان می دهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از صفر به 25 درصد جذب Zn افزایش و با افزایش بیشتر آمونیوم در محلول غذایی جذب Zn کاهش میابد (جدول 5). با توجه به جدولهای 3 و 5 هر چند که اثر اصلی pH بر جذب Zn معنیدار نیست، اما در نسبتهای نیترات به آمونیوم 100:0 و 75:25 با افزایش pH از 4/5 به 8، جذب Zn به طور معنیداری کاهش میابد. کاهش جذب Zn بر اثر افزایش pH پیرامون ریشهها بوسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (Savvas et al. 2003). با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5 در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25، جذب Zn به طور معنیداری افزایش میابد که ناشی از افزایش وزن خشک بخش هوایی میباشد (جدول 3). در نسبتهای نیترات به آمونیوم 25:75 و 0:100 با افزایش pH از 4/5 به 8 جذب Zn افزایش میابد. این افزایش ناشی از افزایش غلظت Zn در این تیمارها میباشد (شکل 5). بیشترین مقدار جذب Zn در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و pH برابر 6/5 میباشد که ناشی از ماده خشک زیاد میباشد. در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100 با وجود اینکه غلظت Zn بخش هوایی در هر سه pH مورد مطالعه زیاد است، مقدار جذب Zn در هر سه pH مورد مطالعه کاهش میابد. بنابراین، این کاهش میتواند ناشی از کاهش ماده خشک بخش هوایی در هر سه pH مورد مطالعه باشد.

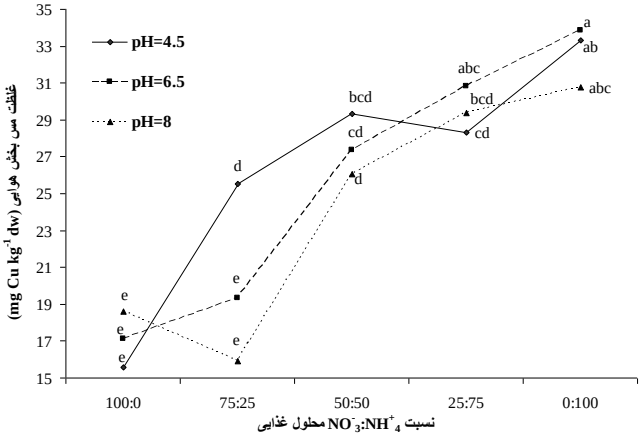
غلظت Zn ریشهها: تجزیه واریانس (جدول 5) نشان میدهد که اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Zn ریشهها معنیدار میباشد ولی اثر pH و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر غلظت Zn ریشهها معنیدار نیست. مقایسه میانگینها نشان میدهد که در هر سه pH مورد مطالعه با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Zn ریشهها به طور معنی-داری افزایش میابد (جدول 5 و شکل 6) که با نتایج Stratton et al.(2001) مطابقت دارد. بین غلظت Zn ریشهها و غلظت Zn بخش هوایی رابطه Zn Shoots = 1.3527(Zn Roots) + 5.1066 با r=0.9** وجود دارد. این رابطه نشان میدهد که با افزایش غلظت Zn ریشههای اسفناج، غلظت Zn بخش هوایی نیز افزایش میابد.



شکل 6- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Zn ریشههای اسفناج

غلظت Cu بخش هوایی: تجزیه واریانس (جدول 6) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Cu بخش هوایی معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی غلظت Cu بخش هوایی به طور معنیداری افزایش میابد (جدول 6) که با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (Hamlin and Barker, 1992; Serna, Kim et al. (2006). (2002) بیان داشتند که کاهش نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی با pH=6/5، تأثیری بر غلظت Cu برگهای درخت هلو ندارد. جدول 6 و شکل 7 نشان میدهند که با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5، غلظت Cu بخش هوایی تغییر معنیداری نمیکند ولی با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 8 غلظت Cu به طور معنی-داری کاهش میابد که با نتایج Islam et al. (1980) مطابقت دارد. همان طور که در شکل 7 مشاهده میشود تیمارهای نیترات خالص کمترین غلظت Cu را دارند. این کاهش را می-توان به افزایش pH ریزوسفر بر اثر تغذیه نیتراتی و کاهش ماده خشک بخش هوایی نسبت داد (جدول 3). با افزایش pH غلظت Cu^{+2} در محلول کاهش یافته و تبدیل به رسوب $Cu(OH)_2$ می-شود (Havlin et al. 2004). Alva and Chen (1995) مشاهده کردند که در pHهای بالاتر و پایینتر از 6/5 در محلول غذایی با نسبت نیترات به آمونیوم 4:1، جذب Cu بوسیله نهالهای

مرکبات کاهش میيابد. دامنه کفایت غلظت Cu بخش هوایی اسفناج 25-5 میلیگرم در کیلوگرم ماده خشک میباشد (Rosen and Eliason, 2005). با توجه به شکل 7، غلظت Cu در اکثر تیمارها در دامنه کفایت قرار دارد ولی در نسبتهای نیترات به آمونیوم 50:50، 25:75 و 0:100 بیشتر از این دامنه قرار میگیرد که ناشی از تأثیر قابل ملاحظه تغذیه آمونیومی بر افزایش غلظت Cu بخش هوایی میباشد.



شکل 7- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Cu بخش هوایی اسفناج

جذب Cu: تجزیه واریانس (جدول 6) نشان میدهد که اثر pH، نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی و اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر مقدار جذب Cu بوسیله اسفناج معنیدار میباشد. مقایسه میانگینها نشان می دهد که با افزایش آمونیوم محلول غذایی از صفر به 50 درصد، جذب Cu افزایش و با افزایش بیشتر آمونیوم محلول غذایی جذب Cu کاهش میيابد (جدول 6). همچنین، جدول 6 نشان میدهد که با افزایش pH محلول غذایی جذب Cu بوسیله گیاه اسفناج به طور معنیداری کاهش میيابد. این کاهش ناشی از کاهش غلظت Cu بخش هوایی (شکل 7) و کاهش ماده خشک گیاه در pH 8 (جدول 3) میباشد. Savvas et al. (2003) نیز گزارش دادند که با افزایش pH محلول غذایی و پیرامون ریشهها جذب Cu کاهش میيابد. میان مقدار جذب Cu و ماده خشک بخش هوایی رابطه خطی بسیار معنیداری با $r=0.854^{**}$ مشاهده گردید که نشان دهنده این است که بخش عمده تغییرات مقدار Cu بخش هوایی اسفناج به تغییرات ماده خشک مربوط است.

جدول 6- مقایسه میانگینهای [1] اثر pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر جذب و غلظت Cu بخش هوایی و ریشههای اسفناج

اثر اصلی	سطوح	غلظت Cu بخش هوایی (mg kg^{-1} dw)	جذب Cu (mg pot^{-1})	غلظت Cu ریشهها (mg kg^{-1} dw)
نسبت نیترات به آمونیوم	100:0	17/11 d	0/51 c	90/75 b
	75:25	20/26 c	1/01 a	91/30 b
	50:50	27/57 b	1/02 a	90/76 b
	25:75	29/50 b	0/63 b	108/70 a
	0:100	32/64 a	0/36 d	92/50 b
pH محلول غذایی	4/5	26/41 a	0/78 a	85/11 b
	6/5	25/70 ab	0/70 b	93/07 b
	8/0	24/14 b	0/65 b	106/20 a

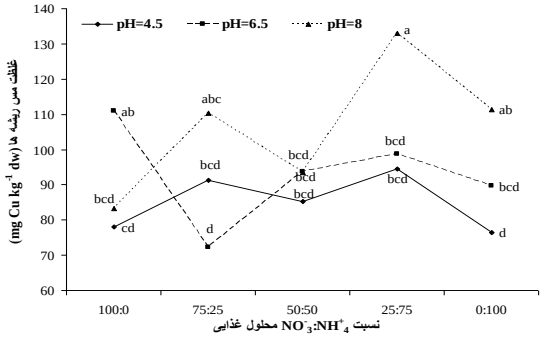
منبع تغییر	سطح احتمال معنیداری		
pH	*	**	**
نسبت نیترات به آمونیوم	**	**	ns
نسبت نیترات به آمونیوم × pH	**	**	*

1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.
ns و ** به ترتیب غیرمعنیدار و معنیدار در سطح احتمال 1٪

غلظت Cu ریشهها: تجزیه واریانس (جدول 6) نشان میدهد که اثر pH، اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم بر غلظت Cu ریشهها معنیدار میباشد ولی اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Cu ریشهها معنیدار نیست. مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 6/5، غلظت Cu ریشهها تغییر معنیداری نمیکند ولی با افزایش pH محلول غذایی از 6/5 به 8 غلظت Cu ریشهها به طور معنیداری افزایش میيابد (جدول 6). شکل 8 نشان می - دهد که تأثیر pH محلول غذایی بر غلظت Cu ریشهها به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بستگی دارد و برعکس. به طوری که: 1) در نسبت نیترات به آمونیوم 100:0، با افزایش pH از 4/5 به 6/5 غلظت Cu ریشهها افزایش میيابد ولی میان غلظت Cu ریشهها در دو pH 6/5 و 8 و دو pH 4/5 و 8 تفاوت

معنیداری وجود ندارد؛ 2) در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25، بین دو pH 4/5 و 8 تفاوت معنیداری وجود ندارد در حالی که در pH 6/5 غلظت Cu ریشهها به طور معنیداری از دو pH دیگر کمتر است؛ 3) در نسبت نیترات به آمونیوم 50:50، تأثیر pH بر غلظت Cu ریشهها معنیدار نیست؛ 4) در نسبت نیترات به آمونیوم 25:75، بین دو pH 4/5 و 6/5 تفاوت معنیدار وجود ندارد در حالی که در pH 8 به طور معنیداری افزایش مییابد؛ 5) در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100 بین pH 6/5 و 4/5 و همچنین بین pH 6/5 و 8 تفاوت معنیدار وجود ندارد در حالی که با افزایش pH از 4/5 به 8 غلظت Cu ریشهها به طور معنیداری افزایش مییابد. کاهش pH ریزوسفر بر اثر تغذیه آمونیومی به ویژه در دو pH 4/5 و 6/5 نه تنها جذب Cu را کاهش میدهد بلکه از طریق صدمه بر بافت ریشهها، متابولیسم ریشه گیاه را مختل نموده و در نتیجه جذب فعال Cu را کاهش میدهد (Alva and Chen, 1995). در نتیجه غلظت Cu ریشهها در دو pH 4/5 و 6/5 در دو نسبت نیترات به آمونیوم مذکور کاهش مییابد. هرچند اثر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Cu ریشهها معنیدار نیست ولی همانطور که در شکل 8 مشاهده میشود در pH 4/5 با افزایش آمونیوم محلول غذایی غلظت Cu ریشهها ابتدا کاهش یافته و مجدداً افزایش مییابد که با نتایج Stratton et al. (2001) مطابقت دارد.

همان طور که در شکلهای 1 تا 8 مشاهده میشود در نسبت نیترات به آمونیوم 0:100، برخلاف انتظار با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 8/0 غلظتهای Fe، Mn، Zn و Cu در ریشهها و بخش هوایی اسفناج افزایش مییابد. این پدیده را می - توان به اثر تغذیه با آمونیوم خالص بر pH ریزوسفر نسبت داد. زیرا ریشه گیاه به ازای جذب یک NH_4^+ یک H^+ به بیرون ترشح میکند که باعث کاهش pH ریزوسفر میشود. به طوری که، در محلول غذایی با pH 8/0، pH ریزوسفر به حدود 6/5 میرسد. به طور کلی، نتایج نشان داد که میتوان با استفاده از نسبت نیترات به آمونیوم مناسب اثرات مضر pH زیاد را بر جذب Fe، Mn، Zn و Cu کاهش داد که با نتایج Savvas et al. (2003) مطابقت دارد. رگرسیون چندگانه با روش گام به گام (ماده خشک بخش هوایی به عنوان متغیر تابع و غلظتهای Fe، Mn، Zn و Cu بخش هوایی به عنوان متغیرهای مستقل) نشان داد که فقط غلظتهای Cu و Mn در مدل وارد میشوند و معادله خط رگرسیون به صورت Dry Matter (g/pot)=101.65- 4.226 (mg Mn/kg dw)+0.365 (mg Cu/kg dw), R= 0.82** می - باشد. علت وارد نشدن غلظتهای Fe و Zn در مدل وجود همبستگیهای بسیار معنیدار میان غلظتهای Fe، Mn، Zn و Cu بخش هوایی اسفناج میباشد.



شکل 8- اثر متقابل pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر غلظت Cu ریشههای اسفناج

فاکتور انتقال: تجزیه واریانس نشان میدهد که تأثیر pH بر فاکتور انتقال عناصر Fe، Mn و Cu معنیدار است ولی بر فاکتور انتقال Zn معنیدار نیست. تأثیر نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر فاکتور انتقال هر چهار عنصر معنیدار است. اثر برهمکنش pH و نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر فاکتور انتقال عناصر Fe، Mn و Zn معنیدار است ولی بر فاکتور انتقال Cu معنیدار نیست (جدول 7). مقایسه میانگینها نشان میدهد که با افزایش pH محلول غذایی فاکتور انتقال عناصر Fe، Mn و Cu کاهش مییابد ولی Zn تغییر نمیکند. با افزایش آمونیوم محلول غذایی فاکتور انتقال هر چهار عنصر افزایش می - یابد ولی در مورد Zn و Mn دوباره کاهش مییابد و Fe ثابت باقی میماند. به طور کلی، تأثیر pH محلول غذایی بر فاکتور انتقال عناصر Fe، Mn، Zn و Cu به نسبت نیترات به آمونیوم محلول غذایی بستگی دارد و برعکس (جدول 7). بنابراین، در مطالعات مربوط به گیاه پالایی بسترهای آلوده به این فلزات بویژه در کشت هیدروپونیک لازم است به pH و شکل نیتروژن کاربردی توجه داشت. زیرا، کارایی گیاه در پالایش هر فلز از بستر آلوده به pH و شکل نیتروژن کاربردی بستگی دارد. میانگین فاکتور انتقال برای چهار عنصر مورد مطالعه به صورت زیر بود:

Cu=0.27< Fe=0.33 < Zn=1.37 < Mn=2.45

بنابراین، در شرایط آزمایش گیاه اسفناج Mn و Zn را در اندامهای هوایی ولی Fe و Cu را در ریشههای خود انباشته کرد. لذا، به نظر میرسد در خاکهای آلوده به Mn و Zn میتوان با کشت گیاه اسفناج این فلزات را از خاک استخراج نموده و به صورت کنترل شده در برنامه تغذیه انسانها وارد کرد تا هم خاک به تدریج اصلاح شود و هم نیاز انسانها به این عناصر تأمین گردد.

جدول 7- مقایسه میانگینهای اثر متقابل pH و شکل نیتروژن محلول غذایی بر فاکتور انتقال Fe، Mn، Zn و Cu

pH	نسبت نیترات به آمونیوم	Fe	Mn	Zn	Cu
4/5	100:0	0/59 a	0/74 de	0/98 d	0/21 de
	75:25	0/36 cd	3/21 abc	1/61 bc	0/32 bcd
	50:50	0/29 def	2/71 bc	1/55 bc	0/38 ab
	25:75	0/30 cdef	3/84 a	1/30 bcd	0/33 bcd
	0:100	0/25 efg	3/29 abc	1/26 bcd	0/47 a
6/5	100:0	0/47 b	0/36 e	0/89 d	0/16 e
	75:25	0/53 ab	2/57 bc	1/77 b	0/29 bcd
	50:50	0/26 efg	3/37 ab	2/33 a	0/32 bcd
	25:75	0/24 fg	3/22 abc	1/34 bcd	0/34 bc
	0:100	0/25 fg	3/03 bc	1/31 bcd	0/40 ab
8/0	100:0	0/35 c	0/30 e	1/26 bcd	0/24 cde
	75:25	0/32 cde	1/23 d	1/08 cd	0/15 e
	50:50	0/31 cdef	2/54 c	1/60 bc	0/31 bcd
	25:75	0/20 g	3/96 a	1/39 bcd	0/23 cde
	0:100	0/20 g	2/66 bc	1/56 bc	0/31 bcd

منبع تغییر	سطح احتمال معنیداری			
pH	××	××	ns	××
نسبت نیترات به آمونیوم	××	××	××	××
نسبت نیترات به آمونیوم × pH	××	××	×	ns

1. در هر ستون، میانگینهای دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنیدار ندارند.
ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنیدار و معنیدار در سطح احتمال 5٪ و 1٪

نتیجهگیری کلی

به طور کلی، با افزایش pH محلول غذایی از 4/5 به 8، جذب Fe، Cu و Mn و غلظت Fe، Cu و Mn بخش هوایی کاهش ولی غلظت Fe و Cu ریشهها افزایش یافت. این در حالی است که جذب Zn، غلظت Zn و Mn ریشهها و غلظت Zn بخش هوایی تغییر معنیداری نکرد. با افزایش آمونیوم محلول غذایی جذب و غلظت Fe، Mn، Zn و Cu ریشهها و بخش هوایی اسفناج افزایش یافت ولی با افزایش بیشتر غلظت آمونیوم، جذب Fe، Mn، Cu و Zn، غلظت Mn و Cu ریشهها و غلظت Fe و Mn بخش هوایی دوباره کاهش یافت. بیشترین مقدار جذب Fe و Zn بوسیله اسفناج در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و pH 6/5 ولی بیشترین مقدار جذب Mn و Cu بوسیله اسفناج در نسبت نیترات به آمونیوم 75:25 و pH 4/5 بود. نتایج نشان داد که با استفاده از نسبت نیترات به آمونیوم مناسب، اثر pH زیاد بر کاهش جذب Fe، Mn، Cu و Zn بوسیله گیاه را میتوان کاهش داد. گیاه اسفناج Mn و Zn را در بخش هوایی در حالی که Fe و Cu را در ریشهها انباشته کرد.

REFERENCES

Alva, A. K. and Chen, E. Q. (1995). Hydrogen ion inhibition of copper uptake by citrus seedlings. In: Kluwer Academic Publishers. P. 631-634. In: Date et al. (eds.) *Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management*. Springer, The Netherlands.

Assimakopoulou, A. (2006). Effect of iron supply and nitrogen form on growth, nutritional status and ferric reducing activity of spinach in nutrient solution culture. *Scientia Horticulturae*, 110 (1), 21-29.

Berdanier, C.D., and Atkins, T. K. (1998). *Advanced Nutrition*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.

Cakmak, I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil*, 247(1), 3-24.

Clark, M. B., Mills, H. A., Robacker, C. D., and Latimer, J. G. (2003). Influence of nitrate: Ammonium ratios on growth and elemental concentration in two azalea cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 26(12), 2503-2520.

Das, M. and Maiti, S. K. (2007). Metal accumulation in 5 native plants growing on abandoned CU-tailings ponds. *Applied Ecology and Environmental Research*, 5(1), 27-35.

Elia, A., P. Santamaria, and Serio, F. (1996). Ammonium and nitrate influence on artichoke growth rate and uptake of inorganic ions. *Journal of Plant Nutrition*, 19(7), 1029-1044.

Epstein, E. and Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*. Second Edition, Sinauer Associates, Inc., USA, 400 pages.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. and Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77, 185-268.

Gupta, P. K. (2000). *Soil, plant, water, and fertilizer analysis*. Agrobios, New Delhi, India.

Hamlin, R. L. and Barker, V.A. (2006). Influence of ammonium and nitrate nutrition on plant growth and zinc accumulation by Indian mustard.

Journal of Plant Nutrition, 29, 1523-1541.

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L. and Nelson, W. L. (2004). *Soil fertility and fertilizers an introduction to nutrient management*. 7th Edition, Prentice Hall, USA.

Hoagland, D. R. and Arnon, D.S. (1950). The water culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular No.* 347, (pp. 1-32). California University, Berkeley, USA.

Islam, A. K. M. S., Edwards, D. G. and Asher. C. J. (1980). pH optima for crop growth "results of a flowing solution culture experiment with six species". *Plant and Soil*, 54, 339-357.

Kane, C. D., Jasoni, R. L., Peffley, E. P., Thompson, L. D., Green, C. J., Pare, P. and Tissue, D. (2006). Nutrient solution and solution pH influences on onion growth and mineral content. *Journal of Plant Nutrition*, 29, 375-390.

Kim, T., H. A. Mills, and Wetzstein, H. Y. (2002). Studies on effects of nitrogen form on growth, development, and nutrient uptake in pecan. *Journal of Plant Nutrition*, 25(3), 497-506.

Kotsiras, A., Olympios, C.M., Drosopoulos, J. and Passam, H.C. (2002) Effect of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruit. *Scientia Horticulturae*, 95, 175-183.

Lindsay A., Benoist, B., Dary O., and Hurrell R. (2006). *Guidelines on Food Fortification with Micronutrients*. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Geneva, Switzerland.

Marschener, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd edition, Academic Press, London.

Mirsoleimani, A. and Tafazoli, E. (2006). Effect of nutrient solution pH on the absorption of iron in four cultivars of grape. *Pajouhesh and Sazandagi*, 71, 12-18 (In Farsi).

Rosen, C. J. and Eliason, R. (2005). *Nutrient management for commercial fruit and vegetable crops in Minnesota*. Regents of the University of Minnesota. USA.

Rothstein, D. E. and Cregg, B. M. (2005). Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*). *Forest Ecol. Manag.* 219, 69-80.

Savvas D., V. Karagianni1, A. Kotsiras, V. Demopoulos, I. Karkamisi1 and Pakou1, P. (2003). Interactions between ammonium and pH of the nutrient solution supplied to gerbera (*Gerbera jamesonii*) grown in pumice. *Plant and Soil*, 254, 393-402.

Serna, M. D., Borras, R., Legaz, F. and Millo, E. P. (1992). The influence of nitrogen concentration and ammonium/nitrate ratio on N-uptake, mineral composition and yield of citrus. *Plant and Soil*, 147, 13-23.

Stratton M.L., Good G.L., and Barker A.V. (2001). The effects of nitrogen source and concentration on the growth and mineral composition of privet. *Journal of Plant Nutrition*, 24(11), 1745-1772.

Tang, C., Zheng, S. J., Qiao,Y. F., Wang, G. H. and Han, X. Z. (2006). Interactions between high pH and iron supply on nodulation and iron nutrition of *Lupinus albus* L. genotypes differing in sensitivity to iron deficiency. *Plant and Soil*, 279, 153-162.

Waling, I., Vark, W. V., Houba, V. J. G. and Van der Lee, J. J. (1989). *Soil and plant analysis, a series of syllabi. Part 7. Plant analysis procedures*. Wageningen Agriculture University, The Netherlands.

Welch, R. M. (2002). The impact of mineral nutrients in food crops on global human health. *Plant and Soil*, 247, 83-90.

Yoon, J., Cao X., Zho Q., and Ma L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 368, 456-464.

Zhang, Y., X. Lin, Y. Zhang, S. J. Zhang, and Du, S. (2005). Effects of nitrogen levels and nitrate/ammonium ratio on oxalate concentration of different forms in edible parts of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 28, 2011-2025.

Zsoldos, F. and Haunold, E. (1982). Influence of 2,4-D and low pH on potassium, ammonium and nitrate uptake by rice roots. *Plant Physiology*, 54, 63-68.