

DEMİR

Toprakta Demir

Yer kabuğunda **diğer besin maddelerinden fazla** olarak ağırlıkça **% 5** kadar ve hemen **her toprakta** bulunur

🔓 Doğada **çok** bulunmasına ve 🔓 Bitkilerin Fe ihtiyacının **az** olmasına rağmen 🔒 **çözünürlüğün** ve 🔒 **alınabilirliğin az** olması nedeniyle bitkilerde

Fe noksanlığı görülür

Toprakta Σ Fe miktarı \gg Çözünebilir Fe miktarı (Fe^{+3} , $Fe(OH)^{2+}$, $FeOH^{+2}$ ve Fe^{+2})

- Havalanma \uparrow ve pH \uparrow Çözünebilir Fe \downarrow (**1000 kat !!!**)
- pH 6.5-8 arasında çözünürlük **MİN**
- Asit topraklarda çözünebilir Fe \gg Alkali (Kireçli) topraklar

Ana materyale bağlı olarak toprakların toplam Fe içeriği **% 0.02-10** arasında değişir

Toprakta Fe;

• **oksitler** (Fe^{+3} ve Fe^{+2} hematit (Fe_2O_3 **kırmızı**), ilmenit ($FeTiO_3$), gotit (**sarı**) ve magnetit (Fe_3O_4)) • **hidroksitler** • **silikat mineralleri** • **amorf oksitler** • **adsorbe Fe** • **organik madde ile kompleks halde** ve • toprak çözeltisinde **bulunur**

Fe içeren primer mineraller;

- olivin, ojit, hornblend ve biotit gibi ferromagnezyumlu mineraller, biotit mikalar

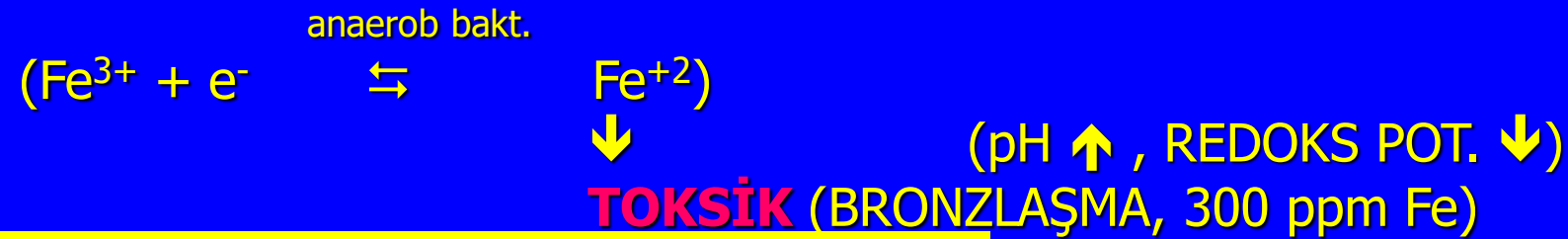
Sedimenter kayalardaki primer Fe formları ise Fe oksitler ve siderit (FeCO_3)'tir

Demir, topraktaki sekonder oluşumlu minerallerin ve killerin yapısında bulunur

- Çözünürlük $\text{Fe}(\text{OH})_3$ çözünürlüğüne bağlıdır



Havalanmayan topraklarda;



Toprak profili boyunca Fe^{+2} miktarı artar

Havalanan topraklarda durum tersine döner

Bu topraklarda Fe' in çözünürlüğünü aşağıdaki faktörler kontrol eder;

- ferrihidrit ($5\text{Fe}_2\text{O}_3$) ve amorf ferrik hidroksit ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) gibi Fe (III) oksitler ile
- toprak organik maddesinden Fe-kleytlerin oluşumu ve mikrobiyel siderefor üretimi

Fe' in kleyt oluşturabilmesi önemli bir özelliktir

- alt toprak katlarında tutulur
- toprakta hareketini kolaylaştırır ve
- bitkilerin Fe beslenmesini düzenler

Bitkide Demir

Demir alımı ve taşınması

Bitkilere Fe^{+2} , Fe^{+3} ve Fe-kleytler şeklinde uygulanabilir

Alınmadan önce indirgenmelidir

Köklerin Fe^{+3} ' ü Fe^{+2} ' ye **indirgeme gücü** Fe alımını etkiler (**STRATEJİ I** ve **STRATEJİ II**)

Fe(III)' e göre **Fe(II) alımı daha fazladır**

Alınma açısından **Fe-KLEYT**ler ile **İNORG-Fe** arasında da **farklılık** olmaktadır

Fe alımı **AKTİF** şekilde olmaktadır

Fe alımına ve kleytleri bozmaya mikroelement katyonları (Mn, Cu, Ca, Mg ve Zn) **antagonistik** etki yapmaktadır

- ▶ yüksek pH, yüksek P ve Ca konsantrasyonu da Fe alımını engeller (**ÇÖKELME!!!**)
- ▶ toprakta ve bitkide çökeltme (iletim demetleri tıkanması ↔ fizyolojik inaktivasyon)
- ▶ **Rizosfer pH' sına etkileri sonucu N formları ve K' da** Fe beslenmesini etkiler

Çizelge 18.1. Mısır bitkisinin aktif ve toplam Fe ile klorofil içeriğine amonyum ve nitrat azotu ile beslenmenin etkisi

Demir uygulaması ^a	N-serve uygulaması ^b	Toplam Fe (mg kg ⁻¹ , kuru ağı.)		Aktif Fe (mg kg ⁻¹ , yaş ağı.)		Toplam klorofil (mg kg ⁻¹ , yaş ağı.)	
		NO ₃	NH ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₃	NH ₄
-	-	54	56	3.10	3.43	4.40	6.33
-	+	60	86	3.38	4.03	4.47	7.27
+	-	67	89	4.12	4.55	5.80	7.33
+	+	65	94	4.05	4.45	5.67	7.40

^a Fe 10 mg kg⁻¹ düzeyinde uygulanmıştır

^b N-serve, uygulanan azotun (150 mg kg⁻¹) % 2' si düzeyinde uygulanmıştır

Fe' in bitkide taşınımı **düşük** ancak Ca' a oranla **daha iyidir**

△ bitkiler gelişmeleri süresince **sürekli Fe almak zorundadırlar.**

Demir bitki bünyesinde **Fe-sitrat** olarak taşınır

★ **kleyt ajanı olan** malik ve sitrik asit gibi alifatik hidroksi asitler, fenoller, tioller, polisakkaritler ve aminoasitlerle **kleyt oluşturarak ta taşınır**

Bitkide toplam Fe' in % 10-20' si **fizyolojik aktif** olduğundan Fe beslenme durumunu;
-toplam Fe kapsamı **yansıtma**
-fizyolojik aktif veya aktif Fe (Fe^{+2}) (*1N HCl veya 1-10 O-phenantrolin*) **yansıtır**

Bitkiler pH' ya bağımlı olan Fe beslenmelerini artırmak üzere;

- ▶ H^+ iyonları,
- ▶ indirgen maddeler ve
- ▶ farklı amino asitleri de içeren kleyt ajanları (fitosiderofor) salgırlar

Salgılama olayı **ritmiktir** ve bu açıdan bitkiler arasında **farklılıklar vardır**

Fe noksanlığında,

*çiftçenekliler ile tekçenekliler (tahıllar hariç) **STRATEJİ I**

-rizodermal transfer hücreleri olarak bilinen fazla sayıda kök tüyü veya kılcak kök oluşturarak ve H^+ iyonları, fenolik bileşikler ve organik asitler salgılayarak

*Tahıllar **STRATEJİ II**

-Protein oluşturmayan aminoasitler salgırlar

Çizelge 18.2. Bitki tür ve çeşitlerinin Fe beslenmelerini artırmak için oluşturduğu mekanizmalar

1. Bitkilerin Fe alımını etkileyen spesifik olmayan mekanizmalar

- Kasyon alımındaki artış (amonyum sülfat beslenmesi) sonucu köklerin sebep olduğu rizosfer pH'ındaki azalış
- Köklerden organik asit salgılanması
- Rizosferdeki mikroorganizmalara besin kaynağı olarak salgılanan fotosentez ürünlerinin pH, redoks potansiyeli, Fe(III) indirgenmesi ve kleytleyici konsantrasyonunu (siderefor) etkilemesi

2. Bitkilerin Fe beslenmesi durumunun bir fonksiyonu olarak oluşturulan spesifik mekanizmalar (Stratejiler)

	Strateji I bitkileri; ayçiçeği, soya fasulyesi, yer fıstığı, diğer çiftçeneklilerin hemen hemen tamamı	Strateji II bitkileri; arpa, yulaf, buğday, çeltik ve muhtemelen diğer tüm tahıl bitkileri veya tahılsız otlar
A: Rizodermal transferHücreleri oluşumu	Önemli	yok
H ⁺ salgılanmasında artış	önemli	yok
Fe(III) indirgenmesinin artışı	Önemli	yok veya az önemli
Fenolik bileşiklerin Salgılanmasında artış	Önemli	bilgi yok veya az önemli
Fe' i kleytleyen protein oluşturmayan aminoasitlerin (fitosiderofor) salgılanmasındaki artış	bilgi yok	çok önemli
B: Marschner (1986)' ya göre avantaj/dezavantajlar		
Fe alımını düzenleme	Önemli	önemli
Çözme işleminin spesifikliği	Düşük	bilinmiyor
Fazla P' a duyarlılık	çok az	yüksek
HCO ₃ ⁻ ve pH' dan etkilenme	çok fazla	çok az

Bu mekanizmalar;

Fe beslenmesi yanında Zn, Cu, Mn, Ni, Co, Pb ve hatta Al beslenmesini da artırır



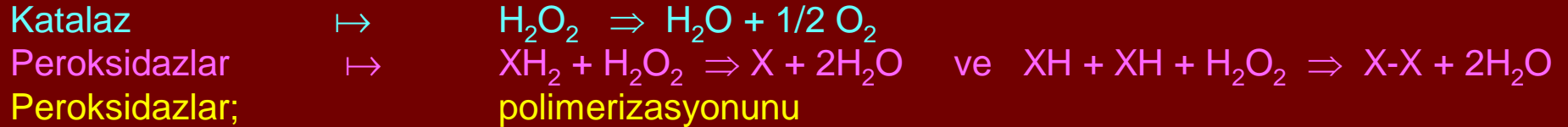
Toksisite Multi-element stresi

Fe-kleytler ya da **yeterli Fe ile beslenme** bu mekanizmaların **oluşumunu engeller**

🔒 Mikroelement noksanlığı

Redoks sistemlerinin Fe içeren bileşenleri

Heme proteinleri: SİTOKROMLAR, KATALAZLAR, PEROKSİDAZLAR



fenollerin \rightarrow lignine katalizler
lignin ile suberin biyosentezi için gereksinilir

•Çizelge 18.3. Domates yapraklarının enzim aktivitesi ve klorofil kapsamına Fe noksanlığının etkisi

Uygulama	Taze yaprakta		Oransal enzim aktivitesi (%)	
	Fe (mg kg ⁻¹)	Klorofil (mg g ⁻¹)	Katalaz	Peroksidaz
+Fe	18.5	3.52	100	100
-Fe	11.1	0.25	20	56

Demir-kükürtlü proteinler:

① Ferrodoksinler ;

- nitrat, sülfid ve N₂ indirgenmesi ve GOGAT gibi metabolik işlevlere elektron aktaran önemli bir proteindir

Çizelge 18.4. Turunçgil yapraklarının klorofil ve ferrodoksin kapsamı ile nitrat redüktaz aktivitesine Fe noksanlığının etkisi

Fe kapsamı (mg kg ⁻¹)	Klorofil (mg g ⁻¹)	Ferrodoksin (mg g ⁻¹)	Nitrat redüktaz (nmol NO ₂ g ⁻¹ taze ağ. saat ⁻¹)
96	1.80	0.82	937
62	1.15	0.44	408
47	0.55	0.35	310
47→81 ^a	-	0.63	943

^a: Fe noksanlığı gösteren koparılmamış yaprağın % 2' lik FeSO₄ ile infiltrasyonundan 40 saat sonra

② Süperoksit dismutaz enziminin (SOD) izoenzimi olan FeSOD' lar

- O₂⁻ radikallerini H₂O₂' e dönüştürerek O₂⁻ radikallerinin toksisitesini giderir ve metal bileşen olarak Cu, Zn, Mn veya Fe içerir

③ Akonitaz (Fe eksikliğinde aktivitesi azalır)

- trikarboksilik asit (TCA) döngüsünde sitratların izositratlara izomerizasyonunu katalizler (TCA →organik asitlerden → SİTRİK ve MALİK ASİT oluşur)

Çizelge 18.5. Fe uygulaması ile yulaf bitkisinin yapraklarının klorofil ve köklerinin organik asit kapsamı arasındaki ilişkiler

Uygulama	Klorofil kapsamı (oransal)	Organik asit kapsamı ($\mu\text{g } 10 \text{ g}^{-1}$ taze ağı.)			
		Malik	Sitrik	Diğerleri	Toplam
+Fe	100	39	11	23	73
-Fe	12	93	67	78	238

Demir gereksinen diğer enzimler:

Lipoksigenazlar;

- linolik ve linoleik asit gibi poli doymamış uzun zincirli yağ asitlerinin peroksidasyonunu katalizlerler
- membranların dayanıklılığı için kritiktir

Kloroplast oluşumu ve fotosentezde demirin rolü:

Kloroplast, fotosentez, protein sentezi, nişasta, şeker ve pigment miktarı Fe beslenmesinden etkilenmektedir

Çizelge 18.6. Fe noksanlığının şekerpancarının yaprak ve kloroplastlarına etkisi

Parametre	Klorofil (mg cm^{-2})		
	Kontrol > 40	Orta noksanlık 20-40	Şiddetli noksanlık < 20
Çözünebilir protein (mg cm^{-2} yaprak alanı)	0.57	0.56	0.53
Ortalama yaprak hücresi hacmi (10^{-8} cm^3)	2.64	2.78	2.75
Kloroplast (adet hücre ⁻¹)	72	77	83
Ortalama kloroplast hacmi (μm^3)	42	37	21
Protein-N' u ($\text{pg kloroplast}^{-1}$)	1.88	1.34	1.24

Çizelge 18.7. Tütün yapraklarının Fe beslenme durumunun klorofil kapsamı ve fotosistem I (PS I) bileşenleri ile PS II ve PS I' in fotosentetik elektron taşıma kapasitelerine etkisi

Uygulama	Fe	Klorofil	PS I bileşenleri			e ⁻ taşıma kapasitesi ^a	
	(µg cm ⁻² yaprak)		P700	Sitokrom (p mol cm ⁻²)	Protein (µg cm ⁻²)	PS I	PS II
+Fe	1.44	89	545	599	108	56	840
-Fe	0.25	26	220	201	38	30	390
-Fe+Fe ^b	1.16	24	430	474	79	36	764

^a: µeq cm⁻² yaprak saat⁻¹

^b: yapraklara Fe uygulamasından 10 gün sonra

Demirin birikimi ve bağlanma durumu:

- Fe' in yaklaşık % 80' i hızlı büyüyen yaprakların kloroplastlarında birikir

Bitkinin değişik aksamalarında (stroma, ksilem, floem, tohum, yaprak) **fitoferritin** formundadır

Çimlenme ↓ Fe⁺², OH· radikalleri

Fe⁺²

Besin çözeltilerinde:

N formları, Kireci ↑, P ↑ topraklarda:

- Klorozlu yaprağın Fe kapsamı \geq Yeşil yaprağın Fe kapsamı
- fizyolojik aktif veya aktif Fe (Fe^{+2}) (*1N HCl veya 1-10 O-phenantrolin*)

Fe \oplus Klorofil

Fe \ominus Klorofil

Demir Noksanlığı

- Kritik değer 50-150 mg kg⁻¹ (Toplam !!!!! Aktif !!!!!)
- Sürgün uçlarında 200 mg kg⁻¹ toplam ve 60-80 mg kg⁻¹ aktif Fe

kritik değer

C4 bitkilerinin Fe ihtiyacı \gg C3 bitkilerinin Fe ihtiyacı
72 mg kg⁻¹ 66 mg kg⁻¹

Klorozlu yaprağın Fe kapsamı \geq Yeşil yaprağın Fe kapsamı (NEDENİ?)

- ① hücre pH' sının yüksekliği
- ② P konsantrasyonunun fazlalığı ve
- ③ metabolik aktif Fe^{+2} ' nin inaktif hale gelmesidir

NOKSANLIK;

Kireçli topraklarda va baklagillerde yaygındır

Şiddetli değilse;

- en genç yapraklar sarımsı-yeşil renk alır
- damarlar arası limon sarısı veya turuncu renge bürünür
- tüm damarlar yeşil rengini korur (**Ağ** görünüm, **KLOROZ**)
- yaprak genç ise kloroz şiddetli olur

Şiddetli ve sürekli ise;

- damarlarda sararabilir (**homojen kloroz**)
- açılmamış yapraklar sarı veya tamamen beyaz renkli olur
- yalnızca yaprak kenarlarındaki damarlar yeşil kalabilir
- yapraklar uzun süre canlı kalabilir

Kloroz şiddetine bağlı olarak;

- yaprak alanı küçülür
- meyve tutumu azalır ve renklenme bozulur
- meyveler küçük, sert ve az sulu olur
- kuru madde oranı azalır, kül ve küldeki Ca, K, P ve Mg artar

TEDAVİ;

Kısa süreli çözümler;

- Toprağa veya yaprağa Fe (inorganik/kleyt)
- Toprağı asitleştirici materyal (elementel S, H₂SO₄ çözeltisi, K' lu gübreler)

Uzun süreli çözümler;

Fe alımını veya kullanımını engelleyen faktörlerin eliminasyonu

- Toprağın strüktürünü bozan **kompaksiyon ve çamurlaşmadan** kaçınmak
- **Oksijen** girişini kolaylaştırarak köklerin alt toprağa doğru gelişmelerini sağlamak
- Toprak strüktürünü geliştirici önlemler almak
- Kolay çamurlaşan ya da kompakte olan topraklarda fazla miktarda S içeren gübreleri (tavuk gübresi dahil) olabildiğince **az kullanmak**
- Toprağı olabildiğince az ve kuru iken tarım **trafiğine** maruz bırakmak
- Meyve bahçelerinde ve bağlıklarda alt bitki olarak derin köklü **yeşil gübre** bitkileri yetiştirerek alt toprağın havalanmasını sağlamak
- Mümkünse toprak pH' sını düzenlemek üzere S' lü gübreler yerine amonyum nitrat ve üre gibi **fizyolojik asit** özellikli gübreleri kullanmak
- Çok derine olmamak üzere az miktarda ve iyi ayrılmış organik madde kullanımı
- Islak mevsimlerde gaz değişimini engelleyen kalın çayır malçlamasından kaçınmak
- Toprağın Ca kapsamına göre P ve K' lu gübreler arasında iyi bir denge kurmak
- Kısa sürede hızlı gelişim ve yaprak oluşumuna yol açacak her türlü işlemde kaçınmak

Demir noksanlığının köklere etkisi

Demir noksanlığında;

- yapraklarda kloroplast oluşum gerilerken
- köklerde morfolojik ve fizyolojik değişiklikler olur

Strateji I' lerde;

- kök uzaması azalır, kök uçları kalınlaşır ve kök tüyü oluşumu artar
- proton salgılanması, köklerin indirgeme kapasitesi ve fenolik bileşiklerin salgılanması artar (**RİTMİK** olarak)
 - gövde büyüme oranı ile klorofil kapsamı değişmeden kalır

Strateji II' lerde ise;

- Fe(III) ile kleyt oluşturabilen **fitosiderofor (PS)** salgılanır

- Topraklara OM ilavesi Fe-kleytlerin oluşmasını ve Fe alımını artırır
- Humik, organik ve fenolik asitler ile sidereforlar da Fe(III) kleytleyen bileşiklerdir
- Mikroorganizmalar siderefor üretirler
 - Hidroksimat, catecholate, rizoferrin
 - Sideroforlar rizosferde daha fazladır
- Alkali topraklarda (sodik, pH > 8.5), OM dispersiyonu sonucu **HUMAT**lar oluşur

Çizelge 18.8. Asit, nötr ve alkali toprakta yetiştirilen yerfıstığı bitkisinin aktif ve toplam Fe ile klorofil içeriğine uygulanan humik asitin etkisi

	Aktif Fe (Fe⁺²) (mg kg⁻¹)	Toplam Fe (Fe⁺²+Fe⁺³) (mg kg⁻¹)	Klorofil (mg kg⁻¹)
Uygulamalar	Asit toprak (pH: 5.65)		
Kontrol	7.26	142	1.96
+Fe	8.25	149	2.21
+HA	7.59	146	2.20
Fe+HA	10.24	257	2.53
	Nötr toprak (pH:7.10)		
Kontrol	5.98	131	1.59
+Fe	9.78	139	1.87
+HA	6.49	144	1.59
Fe+HA	10.18	168	1.67
	Alkali toprak (pH: 8.47)		
Kontrol	5.93	100	0.66
+Fe	6.85	126	0.90
+HA	5.70	139	0.93
Fe+HA	8.99	156	1.06

Kireçten kaynaklanan kloroz

CaCO₃ kapsamı > % 20 olan topraklarda yetişen bitkilerde görülen en yaygın beslenme bozukluğu "Kireçten kaynaklanan kloroz" olarak adlandırılan Fe noksanlığıdır

elma, seftali, turunçgiller, asma, yerfıstığı,
soya fasulyesi, sorgum ve yayla çeltikleri

Kompaksiyon, Fazla nem, Az havalanma, Düşük sıcaklık → → Şiddetlendirir



Strateji II bitkilerde HCO₃ önemi < Strateji I bitkilerde HCO₃ önemi

Yüksek HCO₃⁻ konsantrasyonu;

- ✓ kök büyümesini
- ✓ kök solunumunu
- ✓ kök basıncı aracılığıyla ksileme sıvı aktarımını
- ✓ stokininlerin tepe ve sürgünlere taşınım oranını engeller
- ✓ Fe noksanlığı oluşmadan uzun bir süre önce gövde gelişimini engeller

Fosforun kireçten kaynaklanan klorozdaki rolü ?

Fazla P;

- rizosfer salgılarını azaltır
- Fe' i inaktifleştirir
- klorozlu yapraklarda P miktarı artar (**seyrelme!!!**)

Fazla P Fe noksanlığının *sebebi* değil **SONUCUdur**

Alkali (sodik) topraklarda Fe klorozu ekolojik açıdan önemsizdir

Bitkilerde demir etkinliđi ve kloroza direnç

Köklerle Fe alımında oluşturulan farklılıklar nedeniyle bitkiler;

① Fe-etkin

② Fe-etkin olmayan

Kireçli topraklarda yetişen bitkilerin rizosferinde Fe' in çözünür hale getirilmesi;

① spesifik ve

② spesifik olmayan mekanizmalarla gerçekleşir

② Spesifik olmayan mekanizmalar:

1. $(NH_4)_2SO_4$ beslenmesi ve baklagillerde N_2 fiksasyonunda olduğu gibi katyon alımının teşvik edilmesi sonucu köklerin sebep olduğu pH azalması,
2. P noksanlığında olduğu gibi köklerden organik asit salgılanması,
3. Köklerden, rizosfer mikroorganizmaları için besin kaynağı olan fotosentez ürünlerinin salgılanması ve bunun da rizosferdeki pH, redoks potansiyeli ve kleytleyici (siderefor) konsantrasyonunu etkilemesi,

① Spesifik mekanizmalar: ✓ Strateji I

✓ Strateji II

Demir noksanlığında köklerin indirgeme kapasitesi ve proton salgılamaları ile kireçli topraklarda Fe noksanlığına dirençleri (kloroz direnci) arasında olumlu korelasyon bulunmaktadır

Genotipik farklılıklarda önemlidir!!!!!!!

Çizelge 18.9. Kireçli bir toprakta (pH 8.8; % 23 CaCO₃) yetiştirilen yerfıstığı genotiplerinin verimine Fe-kleyt (10 kg Fe ha⁻¹, FeEDDHA uygulamasının etkisi

Genotipler	Fe-kleyt uygulaması	Verim (kg ha ⁻¹)	Verim artışı (%)
Congo Red	-	833	-
	+	2583	210
Shulamit	-	3305	-
	+	4749	44
71-238	-	4388	-
	+	4777	9

Çizelge 18.10. Fe (III) kleytleyiciler tarafından kireçli bir topraktaki Fe' in çözülmesi ve ⁵⁹Fe (III) kleyt olarak uygulanan Fe' in Fe noksanlığı gösteren arpa bitkisi tarafından alınması

Kleytleyici (10 ⁻⁵ M)	Çözünen Fe miktarı (nmol Fe g ⁻¹ toprak 12 saat ⁻¹)	Fe alımı (nmol Fe g ⁻¹ kuru kök 4 saat ⁻¹)
Fitosiderofor (HMA)	23.6	3456.0
Siderefor (Desferal)	19.2	1.21
Sentetik kleyt (DTPA)	2.0	0.51

Demir Fazlalığı

Demir toksikliği (**bronzlasma**) anaerobik koşullarda yaygın görülür

Kurak koşullarda Fe toksikliğine **serbest radikaller yol açar**

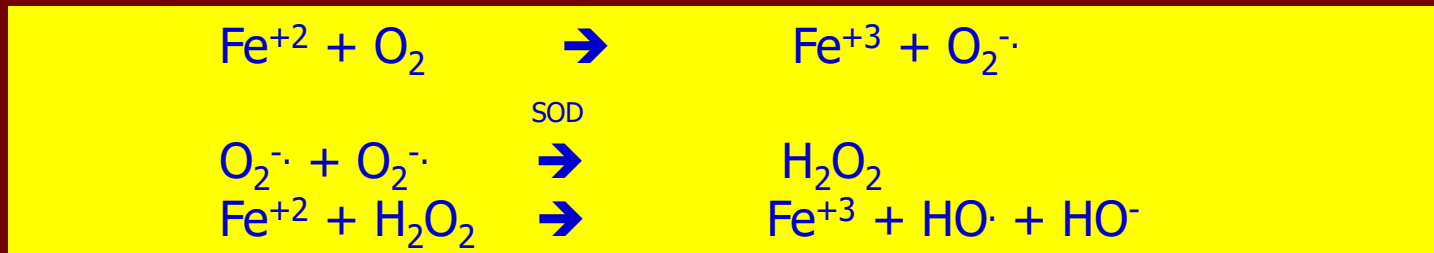
Kritik toksiklik düzeyi 500 mg kg⁻¹

Fe toksikliğinde polifenol oksidaz aktivitesinin artması polifenollerin oksitlenmesi **BRONZLAŞMA**ya sebep olur

K uygulaması;

■ Fe⁺² alımını ↓ ∞ köklerin oksidasyon potansiyelini ↑

Fazla Fe, oksijen radikalleri oluşumunu artırır



Hidroksil (HO·) radikalleri de toksiktir

- membran lipidlerinin peroksidasyonu ile
- protein parçalanmasından sorumludur

Çizelge 18.11. Besin çözeltisindeki Fe konsantrasyonunun 5 gün süreyle O₂ uygulanarak ve uygulanmayarak yetiştirilen tüylü yakıotu bitkisinin protein, lipid peroksidasyonu ve kök enzim aktivitesine etkisi

Uygulanan	Protein (mg g ⁻¹ taze ağı.)		Lipid peroksidasyonu ^a		Kök SOD aktivitesi (EU mg ⁻¹ protein)	
	+O ₂	-O ₂	+O ₂	-O ₂	+O ₂	-O ₂
Fe (μM)						
50	3.39	3.41	0.71	0.63	447	543
180	4.07	3.45	0.54	0.67	513	931
450	2.98	1.44	0.78	1.71	412	2725

^a: okside olan malondialdehit (μmol mg⁻¹ protein)