



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Salisilik Asit Uygulamalarının Tuz Stresi Altındaki Hıyar Bitkilerinde Fotosentetik Aktivite Üzerindeki Etkileri

 Sezen TOKSOY KÖSEOĞLU <sup>a,\*</sup>,  Ali DOĞRU <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Biyoloji Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE*

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: sezentoksoy@sakarya.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.746811

### ÖZET

Tuz stresi (100 mM NaCl) altındaki hıyar (*Cucumis sativus* L.) genotipinde (Beith Alpha F1) ekzojen salisilik asit uygulamasının fotosistem II aktivitesi üzerindeki etkileri klorofil a fluoresansı tekniği yardımıyla araştırılmıştır. 10 günlük hıyar fidelerine 100 mM tuza karşı 50 µM salisilik asit 5 gün süreyle uygulanmıştır. 5. günün sonunda yapılan klorofil a fluoresansı ölçümleri değerlendirilmiştir. Tuz stresi hıyar yapraklarında fotosistem II'nin hem donör hem de akseptör bölgesindeki elektron hareketlerini inhibe etmiştir. Ayrıca tuz stresinin hıyar bitkisinde aktif reaksiyon merkezi miktarını ve kinonA ile plastokinonun indirgenme yeteneğini azalttığı, indirgenmiş reaksiyon merkezlerinin birikimini ve ısı enerjisi kaybını artırdığı belirlenmiştir. Salisilik asit uygulaması ise hıyar bitkilerinde tuz stresinin fotosistem II'nin donör ve akseptör bölgesindeki elektron hareketleri üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmıştır. Ek olarak salisilik asit uygulaması hıyar yapraklarındaki aktif reaksiyon merkezi miktarını ve kinonA ile plastokinonun indirgenme yeteneğini artırırken, indirgenmiş reaksiyon merkezi miktarını ve ısı enerjisi kaybını azaltmıştır. Sonuç olarak salisilik asidin hıyar yapraklarında tuz toleransını artırdığı ve bu yaklaşımın tarımsal amaçlarla kullanılabileceği söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** *Cucumis sativus* L., Salisilik asit, FSII aktivitesi

## Effects of Salicylic Acid Applications on Photosynthetic Activity in Cucumber Plants Under Salt Stress

### ABSTRACT

The effects of the exogenous salicylic acid application on photosystem II activity were investigated in salt-stressed (100 mM NaCl) cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotype (Beith Alpha F1) through chlorophyll a fluorescence technique. 50 µM salicylic acid against 100 mM salt was applied to 10 day old cucumber seedlings for 5 days. Chlorophyll a fluorescence measurements made at the end of the 5th day were evaluated. Salt stress inhibited electron movements both in donor and acceptor site of photosystem II in cucumber leaves. In addition, salt application led to the decreased level of active reaction centers, the accumulation of the reduced reaction centers, the decreased ability of quinoneA and plastoquinone to reduce and the increased thermal dissipation in cucumber leaves. Salicylic acid, on the other hand, ameliorated the adverse effect of salt stress on electron movements in donor and acceptor site of photosystem II in cucumber plants. Moreover, salicylic acid caused to the increased level of active reaction centers, the decreased level of accumulation of the reduced reaction centers, the increased ability of quinonA and plastoquinone to reduce and the decreased thermal dissipation in cucumber leaves. As a result, it may be concluded that salicylic acid application improved salt tolerance in cucumber plants and it may be used for agricultural purposes.

**Keywords:** *Cucumis sativus* L., Salicylic acid, PSII activity

# I. GİRİŞ

İnsanlık tarihinde tarımsal faaliyetlerin ve sulamanın başlamasıyla beraber toprak tuzluluğu önemli bir sorun haline gelmeye başlamıştır. Tuz stresi, dünyadaki ekili alanların yaklaşık %20'sini ve sulu tarım yapılan arazilerin yaklaşık yarısını etkilemektedir. İyonik dengenin yüksek tuz konsantrasyonu ile bozulması bitkilerde ozmotik strese yol açmaktadır. İyon homeostazının düzenlenmesi, tuz stresi altındaki bitkilerde normal fizyolojik aktivitenin sürekliliği için temel kriterlerden biridir. Tuz stresi, hem hücre hem de organizma seviyesinde su potansiyeli ve iyon homeostazını bozmaktadır. Homeostazideki bu değişiklik, moleküler düzeyde hasara, büyümenin durmasına ve nihayetinde bitkinin ölümüne neden olabilmektedir. Tuz stresi koşullarında gözlenen bu birincil etkilere ek olarak, oksidatif hasar da sıklıkla gözlenen bir durumdur. Yüksek tuz konsantrasyonu öncelikle hücre zarı bütünlüğünün bozulmasına, pigment miktarının azalmasına, Rubisco gibi çeşitli enzimlerin aktivitesinde azalmaya, fotosentetik aktivitede inhibisyona ve sonuçta net karbonhidrat sentezinde bir düşüşe neden olmaktadır [1, 2].

Salisilik asit (SA), birçok bitki türünde bulunan fenolik bir madde türevidir ve fenilpropanoid metabolizmasının doğal bir ürünüdür. SA bitki büyümesi, termojenez, çiçeklenme ve iyon alımını gibi olaylarda doğrudan rol oynamaktadır. Etilen biyosentezini ve stoma hareketlerini etkilediği gibi aynı zamanda abisisk asidin (ABA) yaprak absiyonu üzerindeki etkilerini tersine çevirdiği bildirilmiştir [3, 4, 5]. Klorofil ve karotenoid grubundan olan pigmentlerin miktarının artırılması, fotosentetik aktivite ve bazı önemli enzimlerin aktivitesinin artırılması SA'nın bitki metabolizmasında sahip olduğu diğer roller arasında sayılabilir [6].

SA, konsantrasyonuna ve bitki türüne bağlı olarak fotosentez, metabolik süreçler ve bitki-su ilişkilerinin en önemli düzenleyicisi olarak kabul edilmektedir [7]. Stoma kapanmasını [8,9], karbonik anhidraz ve Rubisco [10,11] gibi enzimlerinin aktivitesini, kloroplast yapısını [12] ve klorofil ile karotenoid içeriğini [13] etkilemektedir. Bitkilerin optimal SA miktarına sahip olması, fotosentetik aktivitenin uygun şekilde sürdürülmesine yardımcı olmaktadır. Ekzojen olarak uygulanan SA, türlere bağlı olarak bitkilerdeki fotosentez hızını artırabilir veya azaltabilir. Buradaki artış veya azalmada türün kendisinden ziyade SA'nın uygulama yöntemi, süresi, konsantrasyonu ve çevresel koşullar gibi diğer birçok faktör de önemli rol oynamaktadır [14]. SA'nın, fotosistem II (FSII) verimliliğini ve Rubisco aktivitesini artırarak ısı stresi altında fotosentetik inhibisyonu azalttığı bildirilmiştir [15]. Ayrıca, ısı şoku proteinlerinin seviyelerini artırarak ısı stresi altında FSII'nin korunmasını sağlayarak net fotosentetik hızı artırdığı rapor edilmiştir [15]. SA uygulamasının buğday fidelerinde pigment seviyelerini artırdığı, bunun yanında enzimatik aktivite, yaprak sayısı, taze ve kuru ağırlığı da önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir [16]. Benzer gözlemler [17] Ghai ve ark. (2002)'nin *Brassica juncea*'da yapraklara SA (20 mg/ml) uygulaması ile yaptığı çalışmada da bulunmuştur. Stresli mısır bitkilerinde Rubisco aktivitesi [18] ve hardal bitkilerinde fotosentetik aktivite [13] SA'nın etkisi altında artmıştır. Ayrıca [13] Fariduddin ve ark. (2003), hardal bitkilerinde yüksek fotosentetik aktivite ile ilişkili olarak artan su kullanımı ve karboksilasyon verimlilikleri gözlemlemişlerdir. [13] Fariduddin ve ark. (2003) klorofil içeriği, karbonik anhidraz ve Hill reaksiyonu aktivitesinin yükseldiğini, buna bağlı olarak verimin arttığını bildirmiştir. Benzer şekilde SA, soya fasulyesi, arpa ve mısırdaki fotosentetik aktiviteyi uyarmıştır [18,19,20,21]. Bir başka çalışmada, SA uygulanan su stresi altındaki bitkilerin genellikle daha yüksek su miktarına, kuru madde birikimine, Rubisco'nun yüksek karboksilaz aktivitesine, yüksek süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesine ve yüksek toplam klorofil miktarına sahip olduğu raporlanmıştır [22]. Buğday tohumlarının  $10^{-5}$  M SA'ya maruz bırakılması, pigment miktarını artırmış fakat daha yüksek SA konsantrasyonları pigment içeriğinin azalması ile sonuçlanmıştır [16]. Ayrıca, SA uygulamaları arpa bitkisinde fosfoenol pürivat karboksilaz enziminin aktivitesinde bir artış ve fotosentetik aktivitede bir azalma kaydetmişlerdir. SA ön işlemi tuz stresli arpa fidelerinde bağl su içeriğini, taze ve kuru kütleyi, su içeriğini, fotosentetik pigment, çözünmeyen sakkaritleri ve fosfor miktarını ve peroksidaz aktivitesini artırmıştır [23]. Ekzojen SA uygulamasının tuz stresine önceden uyarlanabilir bir tepki oluşturduğu, fotosentetik pigmentleri koruyan reaksiyonların teşvik edilmesine ve membran bütünlüğünün korunmasına neden olduğu görülmüştür [23]. Fasulye bitkilerinde SA fotosentetik aktivitede tuz kaynaklı azalmayı en aza indirmiştir [24]. Kökten yapılan SA uygulaması,

fotosentetik aktivitenin tuz stresi altında artmasını sağlamıştır [25,26]. Salisilik asit uygulaması, soya fasulyesinde etilen sentezinin geciktirilmesi, membran depolarizasyonuna müdahale, fotosentetik aygıtın uyarılması ve klorofil içeriğinin artırılması ile sonuçlanmıştır [27,28].

Tuz toleransı bir bitkinin tuzlu koşullar altında yaşam döngüsünü tamamlayabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır [33]. Geleneksel ıslah yöntemlerinin kullanılmasıyla günümüze kadar tuz stresine belli oranda tolerans geliştirmiş genotipler elde edilmiştir [34, 35, 36, 37]. Ancak tuz toleransının hem farklı bitki türleri hem de aynı türün farklı genotipleri arasında önemli varyasyonlar göstermesi hem de ekonomik öneme sahip olan bitkilerde tuz toleransının artırılması için yapılan ıslah çalışmalarında kullanılacak güvenilir bir parametrenin eksikliği bu konuda karışıklıklara sebep olmaktadır [35, 37, 38, 39]. Yapılan çalışmalarla bitkilerde tuz stresine verilen metabolik cevapların temel amacının fotosentetik aygıtı tuz stresinin olumsuz etkilerinden korumak ve fotosentetik etkinliğin sürdürülmesini sağlamak olduğu ortaya çıkarılmıştır [40, 41, 42]. Bu sebeple fotosentetik aktivitede meydana gelen değişimler gelişmiş bitkilerde bir stres sensörü olarak kabul edilmektedir [33]. Günümüzde fotosentetik aktivitenin ölçülmesi için en modern ve güvenilir tekniğin klorofil a floresansı olduğu bildirilmiştir [32, 43, 44, 45].

Yukarıda belirtilen çalışmalardan da anlaşıldığı üzere salisilik asit bitkilerde tuz stresinin fotosentetik aktivite üzerinde yaptığı olumsuz etkileri hafifletmiş ve farklı şekillerde artış sağlamıştır. Hıyar bitkisi ülkemizde sera yetiştiriciliğinde önemli bir yer tutar. Dolayısıyla tuz toleransının artırılması verimdeki düşüşleri ve buna bağlı olarak ekonomik kayıpları en aza indirecektir. Tuzluluğun ülkemiz için oluşturduğu tehdit ve hıyar bitkisinin seracılıktaki ekim alanının fazla olması bu çalışmanın yapılmasını teşvik etmiştir. Buna göre bu çalışmanın amacı, tuz stresi altındaki hıyar bitkilerinde kök yoluyla uygulanan ekzojen salisilik asit uygulamasının fotosistem II aktivitesi üzerindeki etkilerinin klorofil a floresansı tekniği ile araştırmaktır.

## **II. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu çalışmada bitki materyali olarak hıyar (*Cucumis sativus* L.) bitkisinin tescilli ve sertifikalı bir kültüvarı olan Beith Alpha F1 kullanılmıştır. Tohumlar Adapazarı/Sakarya'daki lokal tohum satıcılarından temin edilmiştir. Beith Alpha F1 genotipi erkenci, hibrit sofralık hıyar çeşididir. Meyve rengi orta yeşil meyveler 14-16 cm uzunluğunda, parlak, silindirik ve düzgündür. Güçlü bitki yapısına sahip, gelişmesi hızlıdır. Ortalama 50-52 günde ilk hasada gelir [29].

### **A. BÜYÜME KOŞULLARI VE DENEYSEL PLAN**

Eşit büyüklükte ve sağlam olan tohumlar seçilerek cam petri kaplarında bidistile su ile ıslatılmış kurutma kağıtları arasına yerleştirilmiştir. Petri kapları 24 °C sıcaklık ve %40-50 oransal neme sahip olan iklim dolabında karanlık ortamda çimlenmeye bırakılmıştır. Üç gün sonra uniform fideler perlit ve ½ oranında sulandırılmış Hoagland besin çözeltisi içeren saksılara transfer edilerek 25/18 °C sıcaklık (gündüz/gece), 16/8 saat fotoperiyot (gündüz/gece), %50±5 oransal nem ve 200 µmol foton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ışık şiddetine sahip iklim dolabına yerleştirilmiştir. Tuz ve salisilik asit konsantrasyonuna yapılan ön çalışmalar sonucunda karar verilmiştir. On günlük olan bitkiler dört gruba ayrılmıştır. Birinci grupta bulunan kontrol bitkileri çalışmanın sonuna kadar ½ oranında sulandırılmış Hoagland besin çözeltisi ile sulanırken; ikinci gruptaki bitkilere Hoagland besin çözeltisiyle tuz (100 mM NaCl) stresi, üçüncü gruptaki bitkilere Hoagland besin çözeltisine karıştırılarak salisilik asit (50 µM), dördüncü gruptaki bitkilere ise yine Hoagland besin çözeltisinde hazırlanmış tuz stresi ile birlikte salisilik asit uygulaması (100 mM NaCl+50 µM salisilik asit) yapılmıştır. Uygulamalardan 5 gün sonra klorofil a floresansı ölçümleri yapılmıştır. İyi gelişmiş yapraklardan 3'er ölçüm alınmıştır. Uygulama Tesadüf Parselleri Deneme Deseni'nde iki faktörlü ve 3 tekrarlı yürütülmüştür.

## B. KLOROFİL A FLUORESANSI ÖLÇÜMLERİ

Klorofil a fluoresansı ölçümleri bitkilerin yapraklarında bitki verimlilik analizatörü (HandyPEA fluorometresi Hansatech Instruments Ltd., Pentney, King's Lynn, Norfolk, England) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ölçüm için kullanılacak yapraklar, yaprak klipsleri yardımıyla 45-60 dakika karanlık adaptasyonuna maruz bırakılmıştır. Daha sonra karanlığa adapte edilmiş yapraklarda 650 nm kırmızı ışıkla 1 s 3000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  şiddetinde ışık uygulanarak fluoresans uyarılmıştır. Elde edilen parametrelerin değerlendirilmesi PeaPlus ve Biolyzer adlı programlarla uygulanan JIP testi ile yapılmıştır [30]. JIP testi ile ilgili terminoloji Tablo 1.'de verilmiştir.

## C. İSTATİSTİK ANALİZLER

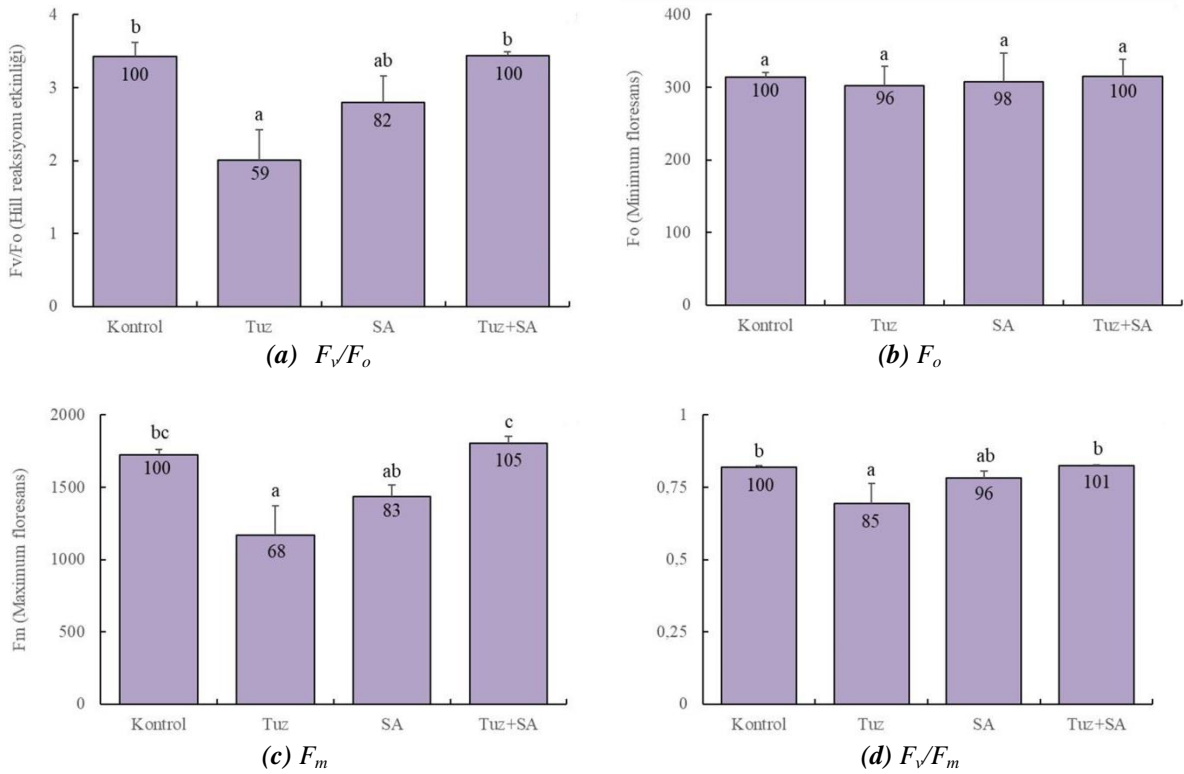
Elde edilen verilerin aritmetik ortalama ve standart hataları hesaplanmış, daha sonra verilere SPSS 22.0 paket programı kullanılarak, istatistiki varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Her bir bağımsız değişken için uygulamaların kontrole göre neden olduğu farkın önem kontrolü (Anlamlı Önemli Fark; AÖF) %5 düzeyinde Duncan testi ile hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Klorofil a fluoresansı ölçümlerine bağlı olarak ölçülen ve hesaplanan bazı klorofil a fluoresansı ve JIP testi parametreleri [31, 32].

Parametreler	
$F_o$	Karanlık adaptasyonu sağlanmış örnekte tüm FS II reaksiyon merkezlerinin açık olduğu andaki minimum fluoresans
$F_m$	Karanlık adaptasyonu sağlanmış örnekte tüm FS II reaksiyon merkezlerinin kapalı olduğu andaki maksimum fluoresans
$F_v$	Fotokimyasal olmayan tüm prosesler minimum seviyede iken maksimum değişken fluoresans
$F_v/F_m$	FS II' nin maksimum kuantum etkinliği
$F_v/F_o$	Hill reaksiyonu (fotoliz) etkinliği
ABS/RC	Reaksiyon merkezi başına FS II'nin ortalama anten boyutu
$ET_o/RC$	Karanlığa uyarlanmış bir numunenin aydınlatılmasının başlangıcında yani $t = 0$ 'da aktif reaksiyon merkezi (RC) başına aktarılan elektron akışı
$TR_o/RC$	$t = 0$ 'da aktif reaksiyon merkezi (RC) başına hapsolmuş uyarma enerjisi akışı
$DI_o/RC$	Reaksiyon merkezi (RC) başına ısı, fluoresans ve fotosistem I'e enerji transferi olarak dağılan toplam enerji ( $t = 0$ 'da)
RC/ABS	FS II'deki anten klorofilleri başına aktif reaksiyon merkezi miktarı
Alan	OJIP eğrisinin üzerinde kalan, $F_o$ ile $F_m$ arasında bulunan ve indirgenmiş plastokinon (PQ) havuzunun boyutunu ifade eden bölge
$t_{F_m}$	$F_m$ 'ye ulaşılması için gereken zaman
$\Delta V/\Delta t_o$	Kapalı (indirgenmiş) reaksiyon merkezlerinin birikim hızı
N	$F_m$ 'ye ulaşılıncaya kadar geçen sürede $Q_A$ 'nın indirgenme sayısı
$PI_{ABS}$	Performans indeksi
$SFI_{ABS}$	FS II'nin yapısal ve fonksiyonel durumunun indikatörü
$S_M$	Tüm reaksiyon merkezlerinin indirgenmesi için gereken enerji
$\Psi_o$	Yakalanan bir eksitonun bir elektronu $Q_A$ 'dan elektron taşınım sistemine hareket ettirme etkinliği
$\phi D_o$	Isı enerjisi kaybının kuantum verimi
$\phi E_o$	$Q_A$ 'dan PQ'ya elektron taşınımının kuantum verimi
$\phi P_o$	Primer fotokimyasal olayların maksimum kuantum verimi
$\phi_o/(1-\phi_o)$	Primer fotokimyasal reaksiyonun etkinliğinin göstergesi ( $Q_A$ 'ya elektron transferi)
$\Psi_o/(1-\Psi_o)$	Isı reaksiyonları için "konformasyon" terimi (ışığa bağlı olmayan reaksiyonlar), sistemden çıkarılan elektronların ve sistemde biriken elektronların oranı

### III. BULGULAR

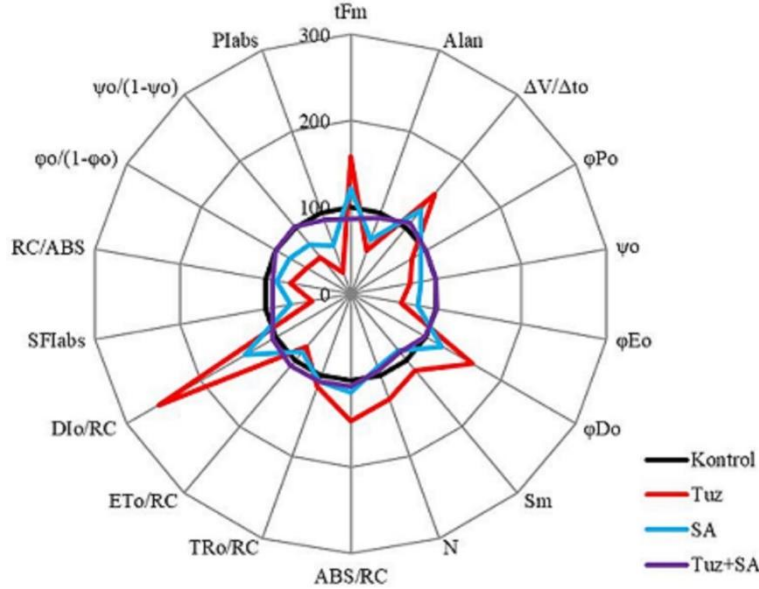
Tuz stresi (100 mM NaCl), salisilik asit (50  $\mu$ M SA) ve tuz+salisilik asit (100 mM NaCl+50  $\mu$ M SA) uygulamalarının hıyar yapraklarındaki bazı klorofil a floresansı parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 1.'de verilmiştir. Buna göre tuz stresi uygulaması hıyar yapraklarındaki  $F_v/F_o$  (Hill reaksiyonu etkinliği) oranını %41,  $F_m$  (maksimum floresans) değerini kontrole göre %32,  $F_v/F_m$  (fotosistem II'nin maksimum kuantum etkinliği) oranını %15, ve oranında ve istatistiksel olarak belirgin derecede azaltmıştır ( $P<0.05$ ) (Şekil 1. a, c ve d).  $F_o$ 'da (minimum floresans) uygulamalar sonucunda kontrol bitkilerine göre istatistiksel bir değişim gözlenmemiştir ( $P>0.05$ ) (Şekil 1. b). Ancak tuz stresi altındaki hıyar bitkilerinde gerçekleştirilen salisilik asit uygulamaları  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ , ve  $F_v/F_o$  parametrelerini sadece tuz stresi uygulanan bitkilerle karşılaştırıldığında sırasıyla %37, %16 ve %41 oranında artırmış ve istatistiksel olarak kontrol bitkilerinde elde edilen değerlere ulaşmasını sağlamıştır ( $P<0.05$ ). Sadece salisilik asit uygulaması ise bu parametrelerde kontrol grubuna ulaşmayı sağlayacak değerlerde bir değişime yol açmamıştır.



**Şekil 1.** Kök yoluyla uygulanan salisilik asidin (50  $\mu$ M) tuz stresi (100 mM NaCl) altındaki hıyar yapraklarındaki (a)  $F_v/F_o$ , (b)  $F_o$ , (c)  $F_m$ , ve (d)  $F_v/F_m$  üzerine etkisi (Barların üzerindeki farklı harfler uygulamalar arasındaki farkın Duncan testine göre  $P=0.05$  seviyesinde farklı olduğunu, barların içindeki rakamlar ise kontrole göre değişimi % olarak göstermektedir, kontrol=100; SA: salisilik asit).

Tuz stresi (100 mM NaCl), salisilik asit (50  $\mu$ M SA) ve tuz+salisilik asit (100 mM NaCl+50  $\mu$ M SA) uygulamalarının hıyar yapraklarındaki bazı JIP testi parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 2.'de verilmiştir. Buna göre SM (tüm reaksiyon merkezlerinin indirgenmesi için gerekli enerji), N ( $F_m$ 'ye ulaşılıncaya kadar geçen sürede kinonA'nın indirgenme sayısı) ve  $TR_o/RC$  (fotosistem II'de reaksiyon merkezi başına yakalanan ve kinonA'nın indirgenmesini sağlayan maksimum enerji) parametrelerinin uygulamalardan kontrollerle karşılaştırıldığında istatistiksel anlamda etkilenmediği gözlenmiştir (Şekil 2.). Tuz stresi ve sadece salisilik asit uygulaması  $PI_{ABS}$  (Performans indeksi) parametresini kontrole karşılaştırıldığında sırasıyla %73 ve %41; Alan (OJIP eğrisinin üzerinde kalan ve  $F_o$  ile  $F_m$  arasındaki bölgenin büyüklüğü) %47 ve %33;  $\Psi_o$ 'ı (yakalanan bir eksitonun bir elektronu kinonA'dan elektron taşınım sistemine hareket ettirme etkinliği) %30 ve %17;  $\Psi_o/(1-\Psi_o)$ 'ı (ısı reaksiyonları için "konformasyon" terimi (ışığa bağlı olmayan reaksiyonlar), sistemden çıkarılan elektronların ve

sistemde biriken elektronların oranı) %45 ve %26 oranında azaltmıştır ( $P<0.05$ ) (Şekil 2.). Ancak tuz stresi altındaki hıyar bitkilerine uygulanan salisilik asit bu parametreleri, sadece tuz stresi uygulanan bitkilerle karşılaştırıldığında istatistiksel olarak önemli derecede artırmıştır ( $P<0.05$ ). Tuz stresi uygulaması hıyar bitkilerinde yapraklardaki  $\phi P_o$ 'ı (primer fotokimyasal olayların maksimum kuantum verimi) kontrole göre %18,  $\phi E_o$ 'ı (kinonA'dan plastokinona elektron taşınımının kuantum verimi) %41,  $SFI_{ABS}$ 'yi (fotosistem II'nin yapısal ve fonksiyonel durumunun indikatörü) %55,  $RC/ABS$ 'yi (fotosistem II'de anten klorofilleri başına aktif reaksiyon merkezi miktarı) %29,  $\phi_o/(1-\phi_o)$ 'ı (primer fotokimyasal reaksiyonun etkinliğinin göstergesi) %41 ve  $ET_o/RC$ 'yi (fotosistem II'de reaksiyon merkezi başına kinonA'dan sonraki basamaklardaki maksimum elektron taşınımı) %20 oranında azaltmıştır ( $P<0.05$ ) (Şekil 2.). Sadece salisilik asit uygulaması ise bu parametrelerde istatistiksel olarak önemli bir değişime yol açmamıştır ( $P>0.05$ ). Tuz stresi hıyar yapraklarındaki  $\Delta V/\Delta t_o$ 'yu (kapalı reaksiyon merkezlerinin birikim hızı) kontrole göre %51,  $\phi D_o$ 'ı (ısı enerjisi kaybının kuantum verimi) %62,  $ABS/RC$ 'yi (reaksiyon merkezi başına fotosistem II'nin ortalama anten boyutu) %47,  $DI_o/RC$ 'yi (fotosistem II'de reaksiyon merkezi başına non-fotokimyasal yolla kaybedilen yayılım enerjisi) %156 ve  $t_{Fm}$ 'yi ( $F_m$ 'ye ulaşılması için gereken zaman) %59 oranında artırmıştır ( $P<0.05$ ) (Şekil 2.). Sadece salisilik asit uygulaması bu parametrelerde istatistiksel bir değişime neden olmamıştır ( $P>0.05$ ). Ancak tuz stresi altındaki hıyar bitkilerine uygulanan salisilik asit, bu parametreleri sadece tuz stresi altındaki bitkilerle karşılaştırıldığında belirgin oranda azaltmıştır ( $P<0.05$ ) (Şekil 2.).



**Şekil 2.** Kök yoluyla uygulanan salisilik asidin ( $50 \mu M$ ) tuz stresi ( $100 \text{ mM NaCl}$ ) altındaki hıyar yapraklarındaki bazı JIP testi parametreleri üzerindeki etkisi (SA: Salisilik asit).

## **IV. TARTIŞMA VE SONUÇ**

Bitki ıslahı oldukça uzun zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle ıslah çalışmalarından elde edilen başarı oranının sınırlı kaldığı rapor edilmiştir [48]. Günümüzde bitkilerde tuz toleransının geliştirilmesi için antioksidant etkinliğe sahip bazı moleküllerin, bazı bitki besin elementlerinin ve bitki büyüme düzenleyicilerinin uygulanması söz konusudur. Salisilik asit gelişmiş bitkiler tarafından sentezlenen, bitki büyümesi-gelişmesi ve fotosentez olayı üzerinde düzenleyici fonksiyona sahip olan fenolik bir bileşiktir [49, 50, 51]. Yapılan çalışmalar salisilik asidin farklı bitki türlerinde tuzluluk, kuraklık ve yüksek sıcaklık gibi abiyotik stres faktörlerine karşı koruma sağladığını göstermiştir [52, 53, 54]. Çalışmamızda hıyar bitkilerine uygulanan tuz stresi FSII'nin maksimum kuantum etkinliğini ( $F_v/F_m$ ) kontrole göre belirgin derecede azaltmıştır.  $F_v/F_m$  oranı birçok gelişmiş bitkide sayısal değer olarak 0.83 civarındadır ve bu değer azalması bir fotoinhibisyon göstergesi olarak kabul edilmektedir [46].

Bu sonuç hıyar bitkisinde tuz stresinin etkisiyle FSII birimlerindeki elektron taşınım reaksiyonlarının belli oranda inhibe edildiğini göstermektedir [44].  $F_v/F_m$ 'e göre performans indeksi ( $PI_{ABS}$ ) multiparametrik olduğundan (primer fotokimyasal olaylar, elektron transportu gibi) daha duyarlı bir JIP parametresidir ve fotosentetik etkinliğin değerlendirilmesinde daha doğru sonuçlara ulaşmayı sağlar [58]. Performans indeksi ( $PI_{ABS}$ ), çoklu-parametrik ifadede fotosentetik aktivitenin üç ana fonksiyonel basamağı (ışık enerjisi absorpsiyonu, eksitasyon enerjisinin yakalanması ve eksitasyon enerjisinin elektron taşınımına dönüşümü) ile bir FSII reaksiyon merkezi kompleksini birleştirir [62].  $F_v/F_m$ ,  $\phi E_o$  ve  $\Psi_o$  gibi parametrelerden türetilen bitkinin fotosentetik performansının bir ölçüsü olan performans indeksi ( $PI_{ABS}$ ) tuz uygulamasıyla belirgin bir şekilde azalmıştır.  $\Psi_o$  parametresinin düşmesi  $Q_A$ 'dan sonra elektronların elektron taşınım sistemine hareketinin bloke olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca,  $\phi P_o$ ,  $\phi E_o$  ve  $\Psi_o$ 'deki düşüşler, FSII reaksiyon merkezlerinin  $Q_A$ 'yı redükte ederken  $Q_B$ 'yi redükte edemedikleri sonucunu da doğrular [58]. Sonuçlarımız tuz stresinin hıyar yapraklarında minimum fluoresansı ( $F_o$ ) etkilemediğini, ancak maksimum fluoresans ( $F_m$ ) değerini kontrole göre azalttığını göstermiştir. [47] Georgieva ve Lichtenthaler (1999)  $F_m$  değerinin FSII'nin akseptör bölgesinin indirgenme durumunu gösterdiğini bildirmiştir. Buna göre çalışmamızda uyguladığımız tuz stresinin hıyar bitkilerindeki FSII birimlerinin akseptör bölgesinin indirgenmesini engellediği sonucuna varılabilir. Tuz uygulaması sonrası  $F_m$  parametresinin düşmesi OJIP eğrisindeki I-P fazında önemli bir düşüşü göstermektedir. Fotoinhibitör koşullar altında  $F_o$  değerinde anlamlı değişiklikler olmamasının sebebinin düzenleyici ya da koruyucu bir mekanizmanın varlığını düşündürmektedir [46, 61].  $F_m$  (P) basamağının, tüm  $Q_A$  moleküllerinin redükte formda olduğu duruma karşılık geldiği ve  $Q_A$  ile ferrodoksin arasında bulunan tüm elektron taşıyıcılarının indirgenmesi sonucunda  $F_m$ 'e ulaşıldığı kabul edilmektedir [59]. Bu çalışmada I-P fazındaki önemli düşüş, tuzun muhtemelen plastokinon havuzunun indirgenme sürecini olumsuz etkilediği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, I-P fazının FSII'ye doğru olan elektron transferi ile FSII'nin akseptör kısmındaki bir engellenmeyle ilişkili olduğu da ileri sürülmektedir [60]. Sonuçlarımız tuz stresi altındaki hıyar bitkilerine uygulanan salisilik asidin, tuz stresinin FSII birimlerindeki elektron hareketleri üzerindeki kısıtlayıcı etkisini ortadan kaldırdığını ve FSII'nin akseptör bölgesinin daha kolay indirgenmesini sağladığını göstermiştir. Nitekim salisilik asit uygulaması tuz stresi altındaki hıyar bitkilerinde  $F_m$  ve  $F_v/F_m$ 'nin önemli derecede artmasını sağlamıştır. Benzer şekilde çalışmamızda Hill reaksiyonunun etkinliği ( $F_v/F_o$ ) tuz stresi uygulanan hıyar bitkilerinde kontrole göre azalmış, ancak salisilik asit uygulaması bu oranın artmasını sağlamıştır.  $F_v/F_o$  parametresi,  $F_v/F_m$  gibi bitkilerin fotosentetik etkinliğini yansıtır [63]. Bu oran FSII'nin lümene bakan kısmında bulunan ve suyu parçalamaktan sorumlu olan yapının etkinliğini ifade etmektedir. Bu yapı tuz stresi gibi çevresel stres faktörlerine karşı fotosentetik elektron taşınım sisteminin en duyarlı bölgesidir. [55] Pereira ve ark. (2000) bu oranda meydana gelen azalmanın fotosentetik elektron taşınımında meydana gelen azalmanın bir göstergesi olduğunu rapor etmiştir. [33] Doğru ve Canavar (2020), [56] Fricke ve Peters (2002) ile tuz stresi altındaki bitkilerde su alınımının belli oranda inhibe edildiğini bildirmiştir. Bu durum tuz stresi altındaki hıyar bitkilerinde  $F_v/F_o$  oranının azalmasına neden olmuş olabilir. Salisilik asit uygulaması ise tuz stresine maruz bırakılmış olan hıyar bitkilerinin ortama olan su ilişkilerini regüle ederek veya suyu parçalayan sistemi koruyarak bu oranın artmasını sağlamış olabilir. Bu sonuç aynı zamanda salisilik asit uygulamasının FSII'nin donör bölgesinin oksitlenme yeteneğini artırdığını da açıkça göstermektedir. Bunun yanı sıra çalışmamızda tuz stresi uygulaması hıyar bitkilerinde primer fotokimyasal reaksiyonun etkinliğini ( $\phi_o/(1-\phi_o)$ ) de azaltmıştır. Muhtemelen fotokimyasal reaksiyonların yavaşlaması ve buna bağlı olarak fotosentezin elektron taşınım reaksiyonlarının ATP ve NADPH gibi ürünlerinin sentez hızının azalması, sistemden çıkarılan elektronların ve sistemde biriken elektronların oranının ( $\Psi_o/(1-\Psi_o)$ ) da azalmasına yol açmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlara göre tuz stresi altındaki hıyar bitkilerinde fotosentetik elektron taşınım reaksiyonlarının yavaşlamasının bir nedeni de aktif reaksiyon merkezlerinin miktarının (RC/ABS) azalması olabilir.  $DI_o/RC$  (FSII'de reaksiyon merkezi başına fotokimyasal olmayan olaylarda kaybedilen yayılım enerjisi) ve  $\phi D_o$  (ısı enerjisi kaybının kuantum verimi) parametrelerinde tuz stresi uygulaması sonucunda meydana gelen azalmalar da bu fikri destekler niteliktedir. Nitekim [57] Kalaji ve ark. (2011) de tuz stresi altındaki arpa bitkilerinde aktif reaksiyon merkezi miktarındaki azalmanın nedeni olarak  $DI_o/RC$  ve  $\phi D_o$ 'daki azalmayı göstermiştir. Salisilik asit uygulaması ise tuz stresi uygulanan hıyar bitkilerinde fotokimyasal ve fotokimyasal olmayan reaksiyonların performansını ve aktif reaksiyon merkezi miktarını artırmıştır. Buna paralel olarak fotokimyasal olmayan olaylarda kaybedilen yayılım enerjisi ve ısı

enerjisi kaybının kuantum verimi de azalmıştır. Çalışmamızda ayrıca kapalı reaksiyon merkezlerinin birikim hızı ( $\Delta V/\Delta t_0$ ) tuz stresi uygulaması altındaki hıyar bitkilerinde önemli derecede artış göstermiştir. Bu sonuç da reaksiyon merkezlerinin tuz stresi etkisiyle indirgenemediğini ve kinonA'nın indirgenme yeteneğinin azaldığını açıkça göstermektedir. Salisilik asit uygulaması ise  $\Delta V/\Delta t_0$  değerini azaltarak kinonA'nın indirgenme yeteneğini artırmıştır. Sonuçlarımız aynı zamanda hıyar bitkilerinde tuz stresinin etkisiyle elektron taşınım sisteminin kinonA'dan sonraki bölümünde de elektron taşınım reaksiyonlarının belli oranda inhibe edildiğini göstermiştir. Nitekim FSII'de reaksiyon merkezi başına kinonA'dan sonraki basamaklardaki maksimum elektron taşınımı ( $ET_0/RC$ ), kinonA'dan plastokinona elektron taşınımının kuantum verimi ( $\phi E_0$ ), yakalanan bir eksitonun bir elektronu kinonA'dan elektron taşınım sistemine hareket ettirme yeteneği ( $\Psi_0$ ) ve indirgenmiş plastokinon havuzunun boyutu (alan) parametrelerinde tuz stresi etkisiyle belirgin azalmalar tespit edilmiştir. Ancak salisilik asit uygulaması bu parametrelerin istatistiksel olarak artmasına ve kontrol seviyesine ulaşmasını sağlamıştır. Tüm bu değişimlerle uyumlu olarak, FSII'nin yapısal ve fonksiyonel durumunun indikatörü olan  $SFI_{ABS}$  parametresi de tuz stresi etkisiyle azalırken, tuz stresi altındaki hıyar bitkilerine yapılan salisilik asit uygulaması ile artış göstermiştir.

Salisilik asidin bitkilerdeki fotosentetik etkinliği ve fotokimyasal aktivitesi üzerindeki çalışmalar oldukça sınırlıdır ve bu konuda çok az bilgi mevcuttur. Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar tuz stresinin hıyar bitkilerinde fotosentezin elektron taşınım reaksiyonlarını sistemin farklı bölgelerinde belirgin derecede inhibe ettiğini göstermiştir. Sonuçlarımız tuz stresinin hıyar bitkilerinde FSII'nin hem donör hem de akseptör bölgesindeki elektron hareketlerini belirli derecede inhibe ettiğini, salisilik asit uygulamasının ise bu inhibisyonu ortadan kaldırdığını göstermiştir. Bunun dışında tuz stresi aktif reaksiyon merkezlerinin miktarını azaltmış ve reaksiyon merkezlerinin oksitlenmesini ve kinonA ile plastokinonun indirgenme yeteneklerini azaltmış, ısı enerjisi kaybını artırmış ancak salisilik asit uygulaması bu olumsuz etkileri ortadan kaldırarak FSII'nin yapısal ve fonksiyonel olarak daha iyi durumda olmasını sağlamıştır. Buna göre, kök yoluyla gerçekleştirilen salisilik asit uygulamalarının hıyar bitkilerinde tuz stresinin FSII aktivitesi üzerindeki inhibitör etkisini ortadan kaldırdığını ve bu yaklaşımın tarımda kullanılmasıyla tuz stresinin yol açtığı ekonomik kayıpların önüne geçilebileceği sonucuna varılabilir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] O.A. El-Shihaby, M.M.N. Alla, M.E. Younis, Z.M. El-Bastawisy, "Effect of kinetin on photosynthetic activity and carbohydrate content in waterlogged or sea-water treated *Vigna sinensis* and *Zea mays* plants," *Plant Biosyst.*, vol. 136, pp. 277–90, 2002.
- [2] T. Janda, E. Horváth, G. Szalai, E. Páldi, "Role of salicylic acid in the induction of abiotic stress tolerance," in *Salicylic Acid-A Plant Hormone*, S. Hayat and A. Ahmad, Eds., Dordrecht, Netherlands: *Springer*, 2007, pp. 91–150.
- [3] A. Larque-Saavedra, "The antitranspirant effect of acetylsalicylic acid on *Phaseolus vulgaris* L.," *Physiol. Plant.*, vol. 43, pp. 126-128, 1978.
- [4] A. Larque-Saavedra, "Stomatal closure in response to acetylsalicylic acid treatments," *Z. Pflanzenphysiol.*, vol. 93, pp. 371-375, 1979.
- [5] V. K. Rai, S. S. Sharma, S. Sharma, "Reversal of ABA-induced stomatal closure by phenolic compounds," *J. Exp. Bot.*, vol. 37, pp. 129-134, 1986.
- [6] S. Hayat, B. Ali, A. Ahmad, "Salicylic acid: Biosynthesis, metabolism and physiological role in plants," in *Salicylic Acid-A Plant Hormone*, S. Hayat and A. Ahmad, Eds., Dordrecht, Netherlands: *Springer*, 2007, pp. 1–14.



- [7] M. Yusuf, S. Hayat, M.N. Alyemini, Q. Fariduddin, A. Ahmad, "Salicylic acid: Physiological roles in plants," in *Salicylic Acid*, S. Hayat et. al., Eds., Dordrecht, Netherlands: *Springer*, 2013, pp. 15–30.
- [8] A. Mateo, P. Muhlenbock, C. Rusterucci, C.C. Chang, Z. Miszalski, B. Karpinska, J.E. Parker, P.M. Mullineaux, S. Karpinski, "Lesion Simulating Disease 1 is required for acclimation to conditions that promote excess excitation energy," *Plant Physiol.*, vol. 136, pp. 2818-2830, 2004.
- [9] M. Melotto, W. Underwood, J. Koczan, K. Nomura, S.Y. He, "Plant stomata function 568 in innate immunity against bacterial invasion," *Cell*, vol. 126, pp. 969–980, 2006.
- [10] S. Hayat, P. Maheshwari, A.S. Wani, M. Irfan, M.N. Alyemini, A. Ahmad, "Comparative effect of 28 homobrassinolide and salicylic acid in the amelioration of NaCl stress in *Brassica juncea* L.," *Plant Physiol Biochem.*, vol. 53, pp. 61–68, 2012.
- [11] M. Yusuf, Q. Fariduddin, P. Varshney, A. Ahmad, "Salicylic acid minimizes nickel and/or salinity-induced toxicity in Indian mustard (*Brassica juncea*) through an improved antioxidant system," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 19, pp. 8–18, 2012.
- [12] A.N. Uzunova, L.P. Popova, "Effect of salicylic acid on leaf anatomy and chloroplast ultrastructure of barley plants," *Photosynthetica*, vol. 38, pp. 243-250, 2000.
- [13] Q. Fariduddin, S. Hayat, A. Ahmad, "Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carboxylation efficiency, nitrate reductase activity and seed yield in *Brassica juncea*," *Photosynthetica*, vol. 41, pp. 281-284, 2003.
- [14] T. Janda, I. Majláth, G. Szalai, "Interaction of temperature and light in the development of freezing tolerance in plants," *J. Plant Growth. Regul.*, vol. 33, pp. 460–469, 2014.
- [15] L.J. Wang, L. Fan, W. Loescher, W. Duan, G.J. Liu, J.S. Cheng, "Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves," *BMC Plant Biol.*, vol. 10, pp. 34–40, 2010.
- [16] S. Hayat, Q. Fariduddin, B. Ali, A. Ahmad, "Effect of salicylic acid on growth and enzyme activities of wheat seedlings," *Acta Agron. Hung.*, vol. 53, pp. 433-437, 2005.
- [17] N. Ghai, R.C. Setia, N. Setia, "Effects of paclobutrazol and salicylic acid on chlorophyll content, hill activity and yield components in *Brassica napus* L. (cv. GSL-1)," *Phytomorphol.*, vol. 52, pp. 83-87, 2002.
- [18] S. F. A. Khodary, "Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants," *Int. J. Agric. Biol.*, vol. 6, pp. 5-8, 2004.
- [19] T. V. Pancheva, L. P. Popova, A. M. Uzunova, "Effect of salicylic acid on growth and photosynthesis in barley plants," *J. Plant Physiol.*, vol. 149, pp. 57-63, 1996.
- [20] P. Kumar, N.J. Lakshmi, V. P. Mani, "Interactive effects of salicylic acid and phytohormones on photosynthesis and grain yield of soybean (*Glycine max* L. Merrill)," *Physiol. Mol. Biol. Plants*, vol. 6, pp. 179-186, 2000.
- [21] W. Khan, B. Prithviraj, D. L. Smith, "Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates," *J. Plant Physiol.*, vol. 160, pp. 485-492, 2003.
- [22] B. Singh, K. Usha, "Salicylic acid induced physiological and biochemical changes in wheat seedlings under water stress," *Plant Growth Regul.*, vol. 39, pp. 137-141, 2003.

- [23] M. A. El Tayeb, "Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid," *Plant Growth Regul.*, vol. 45, pp. 215-224, 2005.
- [24] R. Nazar, N. Iqbal, S. Syeed, N.A. Khan, "Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars," *J. Plant Physiol.*, vol. 168, pp. 807-815, 2011.
- [25] J. Stevens, T. Senaratna, K. Sivasithamparam, "Salicylic acid induces salinity tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Roma): Associated changes in gas exchange, water relations and membrane stabilisation," *Plant Growth Regul.*, vol. 49, pp. 77-83, 2006.
- [26] P. Poór, K. Gémes, F. Horváth, A. Szepesi, M.L. Simon, I. Tari, "Salicylic acid treatment via the rooting medium interferes with stomatal response, CO<sub>2</sub> fixation rate and carbohydrate metabolism in tomato, and decreases harmful effects of subsequent salt stress," *Plant Biol.*, vol. 13, pp. 105-114, 2011.
- [27] C. A. Leslie, R. J. Romani, "Inhibition of ethylene biosynthesis by salicylic acid," *Plant Physiol.*, vol. 88, pp. 833-837, 1988.
- [28] H. J. Zhao, X. W. Lin, H. Z. Shi, S. M. Chang, "The regulating effects of phenolic compounds on the physiological characteristics and yield of soybeans," *Acta Agronomica Sinica*, vol. 21, pp. 351-355, 1995.
- [29] [https://www.biotektohum.com.tr/index.php?route=modules/products&product\\_id=89](https://www.biotektohum.com.tr/index.php?route=modules/products&product_id=89) (Erişim Tarihi: 10.11.2020)
- [30] F. Bussotti, R. J. Strasser, M. Schaub, "Photosynthetic behavior of woody species under high ozone exposure probed with the JIP-test: A review," *Environmental Pollution*, vol. 147, no. 3, pp. 430-437, 2007.
- [31] A. Doğru, "Bazı arpa genotiplerinde kurşun toleransının klorofil a floresansı ile değerlendirilmesi," *Bartın University International Journal of Natural and Applied Science*, c. 2, s. 2, ss. 228-238, 2019.
- [32] V.N. Goltsev, H.M. Kalaji, M. Paunov, W. Bąba, T. Horaczek, J. Mojski, H. Kociel, S.I. Allakhverdiev, "Variable Chlorophyll Fluorescence and Its Use for Assessing Physiological Condition of Plant Photosynthetic Apparatus", *Russian Journal of Plant Physiology*, c. 63, s. 6, ss. 881-907, 2016.
- [33] A. Doğru, S. Canavar, "Bitkilerde tuz toleransının fizyolojik ve biyokimyasal bileşenleri," *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, c. 8, s. 1, ss. 155-174, 2020.
- [34] C. L. Noble, G. M. Halloran, D. W. West, "Identification and selection for salt tolerance in lucerne (*Medicago sativa* L.)," *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 35, pp. 239-252, 1984.
- [35] M. Ashraf, "Breeding for salinity tolerance in plants," *Critical Reviews in Plant Science*, vol. 13, pp. 17-42, 1994.
- [36] M.C. Shannon, "Adaptation of plants to salinity," *Advances in Agronomy*, vol. 60, pp. 75-119, 1998.
- [37] M. Ashraf, "Salt tolerance of cotton: some new advances," *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 21, pp. 1-30, 2002.

- [38] A. Doğru, M. Yılmaz Kaçar, "A preliminary study on salt tolerance of some barley genotypes," *SAU Journal of Science*, vol. 23, pp. 755-762, 2019.
- [39] M. H. Kalaji, S. Pietkiewicz, "Salinity effects on plant growth and other physiological processes," *Acta Physiologia Plantarum*, vol. 143, pp. 89-124, 1993.
- [40] G. C. Papageorgiou, N. Murata, "The unusually strong stabilizing effects of glycine betaine on the structure and function of the oxygen-evolving photosystem complex," *Photosynthesis Research*, vol. 44, pp. 243-252, 1995.
- [41] M. H. Kalaji, P. Guo, "Chlorophyll fluorescence: A useful tool in barley plant breeding programs," in *Photochemistry Research Progress*, A. Sanchez and S.J. Gutierrez, Eds., New York, NY, USA: Nova Publishers, 2008, pp. 439-463.
- [42] Y. Tanaka, T. Hibino, Y. Hayashi, A. Tanaka, S. Kishitani, T. Takabe, S. Yokota, T. Takabe, "Salt tolerance of transgenic rice overexpressing yeast mitochondrial Mn-SOD in chloroplasts," *Plant Science*, vol. 148, pp. 131-138, 1999.
- [43] K. Maxwell, N. G. Johnson, "Chlorophyll fluorescence-a practical guide," *Journal of Experimental Botany*, vol. 51, pp. 659-668, 2000.
- [44] A. Doğru, H. Çakırlar, "Is leaf age a predictor for cold tolerance in winter oilseed rape plants?," *Functional Plant Biology*, vol. 47, pp. 250-262, 2020.
- [45] A. Doğru, H. Çakırlar, "Effects of leaf age on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzymes in winter rapeseeds leaves under cold acclimation conditions," *Brazilian Journal of Botany*, vol. 43, pp. 11-20, 2020.
- [46] O. Björkman, B. Demmig, "Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plants of diverse origins," *Planta*, vol. 170, pp. 489-504, 1987.
- [47] K. Georgieva, H. L. Lichtenthaler, "Photosynthetic activity and acclimation ability of pea plants to low and high temperature treatment as studied by means of chlorophyll fluorescence," *Journal of Plant Physiology*, vol. 155, pp. 416-423, 1999.
- [48] M. Ashraf, H. R. Athar, P. J. C. Harris, T. R. Kwon, "Some prospective strategies for improving crop salt tolerance," *Advances in Agronomy*, vol. 97, pp. 45-110, 2008.
- [49] C. A. Vlot, M. A. Dempsey, D. F. Klessig, "Salicylic acid, a multifaceted hormone to Combat disease," *Annual Review of Phytopathology*, vol. 47, pp. 177-206, 2009.
- [50] M. Arfan, H.R. Athar, M. Ashraf, "Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two differently adapted spring wheat cultivars under salt stress?," *J. Plant Physiol.*, vol. 6, no. 4, pp. 685-694, 2007.
- [51] M. Iqbal, R. Khan, M. Asgher, Nafees A. Khan, "Alleviation of salt-induced photosynthesis and growth inhibition by salicylic acid involves glycinebetaine and ethylene in mungbean (*Vigna radiata* L.)," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 80, pp. 67-74, 2014.
- [52] F. Palma, M. López-Gómez, N.A. Tejera, C. Lluch, "Salicylic acid improves the salinity tolerance of *Medicago sativa* in symbiosis with *Sinorhizobium meliloti* by preventing nitrogen fixation inhibition," *Plant Sci.*, vol. 208, pp. 75-82, 2013.

- [53] S. Yazdanpanah, A. Baghizadeh, F. Abbasi, "The interaction between drought stress and salicylic and ascorbic acids on some biochemical characteristics of *Satureja hortensis*," *Afr. J. Agric. Res.*, vol. 6, pp. 798-807, 2011.
- [54] M.I.R. Khan, N. Iqbal, A. Masood, T.S. Per, N.A. Khan, "Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation," *Plant Signal. Behav.*, vol. 8, pp. 263-274, 2013.
- [55] W. E. Pereira, D. L. de Siqueira, C. A. Martinez, M. Puiatti, "Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminum stress," *Journal of Plant Physiology*, vol. 157, pp. 513-520, 2000.
- [56] W. Fricke, W. S. Peters, "The biophysics of leaf growth in salt-stressed barley a study at the cell level," *Plant Physiology*, vol. 129, pp. 374-388, 2002.
- [57] M. H. Kalaji, B. Govindjee, K. Bosa, J. Koscielniak, K. Z. Golaszewska, "Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO<sub>2</sub> assimilation of two Syrian barley landraces," *Environmental and Experimental Botany*, vol. 73, pp. 64-72, 2011.
- [58] N. Çiçek, H. Çakırlar, R. T. Strasser, "Arpa bitkisinde ultraviyole-B stresinin fotosistem II etkinliği üzerine etkisi", *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi –C Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji*, c. 2, s. 1, ss. 9-19, 2012.
- [59] R.J. Strasser, A. Srivastava, and K. B. Govindjee, "Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria", *Photochemistry and Photobiology*, c. 61, ss. 32-42, 1995.
- [60] G. Schansker, S.Z. Toth, R.J. Strasser, "Dark recovery of the Chl a fluorescence transient (OJIP) after light adaptation: The qT-component of nonphotochemical quenching is related to an activated photosystem I acceptor side", *Biochimica et Biophysica Acta*, c. 1757, ss. 787-797, 2006.
- [61] C.B. Osmond, J. Ramus, G. Levavasseur, L.A. Franklin, W.J. Henley, "Fluorescence quenching during photosynthesis and photoinhibition of *Ulva rotundata* Blid", *Planta*, c. 190, ss. 97-106, 1993.
- [62] M. Tsimilli-Michael, P. Eggenberg, B. Biro, K. Köves-Pechy, I. Vörös, R. Strasser, "Synergistic and antagonistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers on the photosynthetic activity of alfalfa, probed by the polyphasic chlorophyll a fluorescence transient OJIP", *Applied Soil Ecology*, c. 15, s. 2, ss. 169-182, 2000.
- [63] Ş. Çulha Erdal, "Aspir genotiplerinde kuraklığa dayanıklılığın fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde incelenmesi", *Doktora Tezi, Biyoloji Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye*, 2017.