İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SULAMA AMAÇLI BİR BARAJIN OPTİMUM İŞLETME MODELİNİN BELİRLENMESİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Sabahattin IŞIK
(501960036009)

104243

104243

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Ocak 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Mayıs 2001

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Cevat ERKEK**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof. Dr. Sedat KAPDAŞLI (İ.T.Ü.)**

Prof. Dr. Necati AĞIRALİOĞLU (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Sabahattin ÜÇ (Y.T.Ü.)

Prof. Lütfi SALTABAŞ (S.A.Ü.)

MAYIS 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bir sulama amaçlı barajın sahasında suyun bitkilere optimum dağıtılması problemi geliştirilen model ve yöntemler çerçevesinde incelenmiştir.

Çalışmalarım süresince engin tecrübe ve bilgisiyle beni en iyi şekilde yönlendiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Cevat ERKEK'e yardımlarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca teşvik ve desteklerini esirgemeyen Prof. Lütfi SALTABAŞ ve Prof. Dr. Mustafa Y. KILINÇ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında gerekli verilerin toplanmasında yardımcı olan Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsünden Zir. Yük. Müh. Adem İLBEYİ, DSİ Etüd ve Plan Dairesi Başkanlığından İnş. Yük. Müh. Cansen AKKAYA ve DSİ III.Bölge - 34. Şube Müdürlüğünden Zir. Yük. Müh. Galip GÜLTEKİN'e teşekkür ederim. Ayrıca eşim Zeynep Nilüfer ve oğlum Zeynel Abidin IŞIK'a çalışmalarım boyunca gösterdikleri fedakarlıktan dolayı teşekkür ederim.

Ocak 2001 **Sabahattin IŞIK**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
KISALTMALAR	**vii**
TABLO LİSTESİ	**viii**
ŞEKİL LİSTESİ	**ix**
SEMBOL LİSTESİ	**xi**
ÖZET	**xv**
SUMMARY	**xx**
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Konusu	2
1.3. Çalışmanın Düzeni	3
2. TOPRAK-BİTKİ-ATMOSFER SİSTEMİ	**4**
2.1. Giriş	4
2.2. Toprak Su Tutma Kapasitesi	5
2.3. Toprak-Bitki Sisteminde Suyun Hareketi	6
2.4. Toprak Nemi Dengesi	8
2.5. Bitki Kök Yapısı ve Gelişimi	9
3. EVAPOTRANSPİRASYON	**13**
3.1. Giriş	13
3.2. Evapotranspirasyon Ölçüm Metotları	14

3.3. Bitki Su İhtiyacı (Evapotranspirasyon) Hesap Metotları 17

3.3.1. Blaney-Criddle Metotları 17

3.3.2. FAO Tava Buharlaşma Metodu 18

3.3.3. FAO Radyasyon Metodu 19

3.3.4. Jensen-Haise Yonca-Referans Radyasyon Metodu 20

3.3.5. Thornthwaite Metodu 21

3.3.6. Penman Metotları 21

3.4. Evapotranspirasyon Metotlarının Mukayesesi 27

3.5. Bitki Evapotranspirasyonu 31

3.5.1. Yeterli Toprak Nemi Durumunda (Potansiyel) Bitki Evapotranspirasyonu ve Bitki Katsayıları 32

3.5.2. Yetersiz Toprak Nemi Durumunda (Aktüel) Bitki Evapotranspirasyonu ve Bitki Stres Katsayısı 38

4. SU-BİTKİ VERİMİ İLİŞKİLERİ 42

4.1. Giriş 42

4.2. Bitki Su Üretim Fonksiyonları 43

4.3. Maksimum Verim 45

4.4. Kısıntılı Sulama 46

5. HAZNE İŞLETME ÇALIŞMASI 50

5.1. Giriş 50

5.2. Analiz Periyodu ve Zaman Aralıkları 51

5.3. Hazne İşletme Kuralları 52

5.4. Hazne Giriş Akımlarının Stokastik Modellemesi 54

6. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ 57

6.1. Giriş 57

6.2. Klasik Optimizasyon Yöntemleri 57

6.3. Simülasyon Yöntemleri 57

6.4. Matematik Optimizasyon Yöntemleri 58

6.4.1. Doğrusal Programlama 59

6.4.2. Dinamik Programlama 60

7. SULAMA MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ 63

7.1. Önceden Yapılmış Çalışmalar 63

7.2. Sulama Programlaması ve Paket Programları 65

7.3. Bitki Su Tüketim Modeli 66

7.3.1. Yapılan Kabuller 66

7.3.2. Bitki Sulama Suyu İhtiyacı 67

7.3.3. Toprak Nemi Dengesi 69

7.4. Sulama Programı Modeli 70

7.4.1. Genel Esaslar 70

7.4.2. Modelin Geliştirilmesi 72

7.5. Modelin Amaç Fonksiyonu ve Kısıtları 78

7.6. Model İçin Geliştirilen Program 80

8. SULAMA MODELİNİN UYGULAMASI 82

8.1. Giriş 82

8.2. İklim ve Su Kaynakları 83

8.3. Toprak ve Bitki Verileri 86

8.4. Optimum Bitki Deseni 88

8.5. Bitki Türlerine Göre Evapotranspirasyon, Bitki Katsayıları ve Toprak Nemi Sonuçları 93

8.5.1. Hububat 93

8.5.2. Mısır 96

8.5.3. Patates 98

8.6. Bitki Su ve Sulama Suyu İhtiyacı 100

8.7. Hazne İşletme Çalışması 108

8.8. Gerçekleşen Verim ve Net Faydalar 110

9. SONUÇLAR **113**

KAYNAKLAR **113**

EKLER **123**

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR

ASCE	: American Society of Civil Engineers
DİE	: Devlet İstatistik Enstitüsü
DSİ	: Devlet Su İşleri
FAO	: Food and Agriculture Organization
SCS	: Soil Conservation Service
USBR	: United States Bureau of Reclamation
USDA	: United States Department of Agriculture

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1	ET Metotlarının Karşılaştırılması (Jensen ve diğ., 1990)	29
Tablo 8.1	Çavdarhisar Barajı Karakteristik Değerleri (DSİ, 1977)	85
Tablo 8.2	Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Miktarları (Ortalama Yıl)	105
Tablo 8.3	Bitkilerin Aylık Su İhtiyaçları (milyon m^3, Ortalama Yıl)	106
Tablo 8.4	Bitkiler İçin Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları (Ortalama Yıl)	107
Tablo A.1	Bitki Verileri Data Dosyası (CROPDATA.DAT)	123
Tablo A.2	Meteoroloji Verileri Dosyası (METEDATA.DAT)	125
Tablo A.3	Hidroloji Verileri Dosyası (HYDRDATA.DAT)	129
Tablo B.1	Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Yükseklikleri (Sulak Yıl) .	140
Tablo B.2	Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Miktarları (Sulak Yıl)	141
Tablo B.3	Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Yükseklikleri (Kurak Yıl) .	142
Tablo B.4	Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Miktarları (Kurak Yıl)	143

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Toprak Su Tutma Eğrisi (Thein, 1985)	5
Şekil 2.2	Toprak Nem Dengesi	8
Şekil 2.3	Üniform Toprak Profili İçin Bitki Köklerinin Derinlik Boyunca Dağılımları (Neumann, 1982)	9
Şekil 2.4	Kök Bölgesinde Su Kullanımı Dağılımı	10
Şekil 3.1	ASCE ve FAO Penman Monteith Metodları Arasındaki İlişki (Allen ve diğ., 1994b)	30
Şekil 3.2	K_{cb}, K_e, ve K_c Bitki Katsayılarının Büyüme Evrelerindeki Değişimleri (Allen ve diğ., 1998) ..	34
Şekil 3.3	Su Stres Katsayısının Toprak Su Muhtevası İle Değişimi	41
Şekil 4.1	Verim ile Su Temini Arasındaki İlişki (Stewart ve Hagan, 1973) ...	43
Şekil 4.2	Buğday İçin Olgunlaşma Devresinde Su-Verim İlişkisi	47
Şekil 6.1	Dinamik Programlamada Geriye Doğru (Backward) ve İleriye Doğru (Forward) Çözüm Teknikleri Şeması	61
Şekil 7.1	Kök Bölgesinde Toprak Suyu Elemanları	67
Şekil 7.2	Kök Bölgesinde Toprak Nemi Dengesi (Vedula ve Mujumdar, 1992)	69
Şekil 7.3	Biriktirme Haznesi İle Kök Bölgesi Arasındaki Entegrasyon	73
Şekil 7.4	Sulama Programlaması Modelinin Genel Şeması	77
Şekil 7.5	Ana Programın Akış Diyagramı	81
Şekil 8.1	Çavdarhisar Barajı ve Sulama Sahasının Yeri	82
Şekil 8.2	Maksimum ve Minimum Sıcaklıklar ile Yağış Ortalamaları	84
Şekil 8.3	Maksimum ve Minimum Nispi Nem Oranları ile Rüzgar Hızları ..	84
Şekil 8.4	Ölçülen ve Üretilen Akımların Ortalamasının Karşılaştırılması	85
Şekil 8.5	Bitkilerin Büyüme Sezonu	86
Şekil 8.6	Bitkilerin Birim Alandan Elde Edilecek Maksimum Verimleri	87
Şekil 8.7	Bitkilerin Birim Alanda Fayda-Maliyet-Net Fayda Değerleri	87
Şekil 8.8	Net Fayda ve Birim Sulamaya Karşılık Net Fayda Değerleri	88
Şekil 8.9	Ortalama Yıl İçin Çeşitli Durumlara Göre Bitkilerin Net Faydaları .	89
Şekil 8.10	Ortalama Yıl İçin Optimum Bitki Deseni	90
Şekil 8.11	Sulak Yıl İçin Tam Sulamada Bitkilerin Net Faydaları	90
Şekil 8.12	Sulak Yıl İçin Optimum Bitki Deseni	91
Şekil 8.13	Kurak Yıl İçin Çeşitli Durumlara Göre Bitkilerin Net Faydaları	92
Şekil 8.14	Kurak Yıl İçin Optimum Bitki Deseni	92
Şekil 8.15	Bitkilerin Gerçek Evapotranspirasyon Miktarları	93
Şekil 8.16	Bitki Evapotranspirasyonları (Hububat)	95
Şekil 8.17	Bitki Katsayıları (Hububat)	95
Şekil 8.18	Toprak Su Muhtevaları (Hububat)	95
Şekil 8.19	Bitki Evapotranspirasyonları (Mısır)	97
Şekil 8.20	Bitki Katsayıları (Mısır)	97

Şekil 8.21 Toprak Su Muhtevaları (Mısır) 97
Şekil 8.22 Bitki Evapotranspirasyonları (Patates) 99
Şekil 8.23 Bitki Katsayıları (Patates) 99
Şekil 8.24 Toprak Su Muhtevaları (Patates) 99
Şekil 8.25 Bitkilerin Sulama Suyu İhtiyaçları 100
Şekil 8.26 Bitki Su İhtiyacı Kısıntı Oranları (Ortalama Yıl) 102
Şekil 8.27 Sulama Suyu Kısıntı Oranları (Ortalama Yıl) 102
Şekil 8.28 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Ortalama Yıl) 103
Şekil 8.29 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Sulak Yıl) 104
Şekil 8.30 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Kurak Yıl) 104
Şekil 8.31 Bitkiler İçin Gerekli Su Miktarları 106
Şekil 8.32 Haznede Aylık Biriken ve Çekilen Su Miktarları 109
Şekil 8.33 Hazne Kapasitesinin Değişimi 109
Şekil 8.34 Birim Alanda Gerçekleşen Verim Miktarları 111
Şekil 8.35 Gerçekleşen Toplam Verim Miktarları 111
Şekil 8.36 Gerçekleşen Toplam Net Fayda Miktarları 112
Şekil B.1 Ayçiçeği için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 131
Şekil B.2 Soğan için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 131
Şekil B.3 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 131
Şekil B.4 Fasulye için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 132
Şekil B.5 Domates için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 132
Şekil B.6 Nohut için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 132
Şekil B.7 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi 133
Şekil B.8 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi 133
Şekil B.9 Soğan için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi 133
Şekil B.10 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi .. 134
Şekil B.11 Fasulye için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi 134
Şekil B.12 Domates için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi 134
Şekil B.13 Nohut için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi 135
Şekil B.14 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi . 135
Şekil B.15 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 135
Şekil B.16 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 136
Şekil B.17 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 136
Şekil B.18 Fasulye için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 136
Şekil B.19 Domates için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 137
Şekil B.20 Nohut için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 137
Şekil B.21 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 137
Şekil B.22 Hububat için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 138
Şekil B.23 Mısır için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 138
Şekil B.24 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 139
Şekil B.25 Patates için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi 139
Şekil B.26 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları 144
Şekil B.27 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları 144
Şekil B.28 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları 144
Şekil B.29 Hububat için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri .. 145
Şekil B.30 Mısır için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri 145
Şekil B.31 Ayçiçeği için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri . 146
Şekil B.32 Patates için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri 146

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

SEMBOL LİSTESİ

a	: Kök çapı
a_{ij}, b_i, c_j	: Parametreler
AREA	: Bitkilerin ekim alanı
a_w, b_w	: ET hesabında ampirik katsayılar
c	: Düzeltme faktörü
C_p	: Sabit basınçtaki nemli havanın özgül ısısı
CR	: Kök bölgesine doğru kapilarite yükselmesi
C_T	: Sıcaklık katsayısı
$D(\theta)$	: Toprak suyu yayınırlığı (yayılma gücü)
D_e	: Islanmayı müteakip topraktan toplam buharlaşma derinliği
DP	: Kök bölgesinden derine süzülme
DQM_L	: L büyüme aşamasında bitkinin kullandığı mevcut toprak suyu
d_r	: Dünya-güneş arası nispi mesafe inversi
E	: Buharlaşma
E(x)	: Hazneye giren net akımların ortalaması
E(y)	: Haznenin sağladığı su miktarının ortalaması
E_0	: Serbest su yüzeyinden buharlaşma
e_1, e_2	: Bir alanda, yılın en ılıman ayının ortalama minimum ve ortalama maksimum sıcaklıklarında doygun buhar basınçları
e_a	: Havanın ortalama gerçek buhar basıncı
E_d	: Dağıtım kaybı oranı
E_i	: İletim kaybı oranı
E_{pan}	: Tava buharlaşması
e_s	: Günlük ortalama sıcaklıkta doymuş buhar basıncı
ET	: Evapotranspirasyon
ET_0	: Referans bitki evapotranspirasyonu
ET_a	: Aktüel evapotranspirasyon
ET_m	: Maksimum evapotranspirasyon
E_u	: Uygulama kaybı oranı
F	: Aylık su kullanma kapasitesi faktörü
f(u)	: Rüzgar fonksiyonu
f_c	: Bitki tarafından örtülen toprak yüzeyinin ortalama oranı
f_{ew}	: Bitki örtüsüz ve ıslak olan toprağın oranı
f_w	: Sadece ıslatılan toprak yüzeyinin oranı
G	: Toprak ısı akımı yoğunluğu
G_e	: Yeraltı suyunun dikkate alınan toprak derinliğine yaptığı katkı miktarındaki su
G_f	: Amaçlanan fayda veya değer
G_{sc}	: Güneş sabiti
H	: Toprak su potansiyeli
h_c	: Ortalama bitki yüksekliği
I	: Sıcaklık indisi

IRR : Sulama suyu yüksekliği
J : Yılbaşından itibaren takvim günü sayısı
J_c : Bitki kökünün tam gelişmiş olduğu tarih
J_p : Bitkinin ekim tarihi
K : Haznenin kullanılabilir (aktif) kapasitesi
k : Aylık bitki su kullanma katsayısı
$K(\theta)$: Hidrolik iletkenlik
K_c : Bitki katsayısı
K_{cb} : Temel bitki katsayısı
K_{cmax} : Yağış veya sulamayı müteakip K_c'nin alabileceği maksimum değer
K_{cmin} : Bitki örtüsü olmadığı durumda kuru çıplak toprak için minimum K_c'nin değeri
K_e : Toprak suyu buharlaşma katsayısı
KKO_L : L büyüme aşamasında kısıntı kontrol oranı
K_p : Tava katsayısı
K_r : Topraktan buharlaşmayı azaltma katsayısı
K_s : Bitki su stres katsayısı
k_t : İklim faktörü
K_y : Verim duyarlılık faktörü
L : Bitki büyüme evresi uzunluğu
m : Bitki, suyun mevcudiyeti ve hava şartlarıyla ilgili sabit
MAF_i : Su kullanılabilirlik faktörü
P : Atmosfer basıncı
p : Aylık ortalama gündüz saatlerinin yıllık ortalama gündüz saatlerine oranı
p_b : Kullanılabilir toprak neminin güvenli tüketilebilir kısmı
$PD_{max,m}$: Her bir kök bölgesi için kök yoğunluğunun maksimum oranı
P_e : Etkili yağış yüksekliği
Q : Bitkinin birim zamanda birim kök uzunluğundan su çekim miktarı
Q_t : Birim zamanda hazneye giren akımlar
R : Kök ekseninden radyal mesafe
R_a : Atmosferin dış yüzeyinde alınan radyasyon miktarı
r_a : Atmosfer sınır tabakasının içine su buharı yayılmasına karşı hava dinamiği direnci
RAW : Kök bölgesinde bitkinin strese girmeden çekebileceği su
r_c : Su buhar transferine karşı bitki gölge direnci
RD : Kök derinliği
REL : Hazneden bitkilere verilen su bırakma miktarı
$RETF_i$: i tabakası için ET dağıtım faktörü
REW : Topraktan azaltma olmadan tam buharlaşabilen su derinliği
RH_{mean} : Havanın ortalama nispi nem oranı
RH_{min} : Havanın günlük minimum nispi nem oranı
R_n : Net radyasyon
R_{nl} : Net uzun dalga radyasyonu
R_{ns} : Net kısa dalga radyasyonu
r_p, r_s : Bitki ve topraktaki akıma karşı direnç
R_s : Güneş radyasyonu
R_{so} : Açık hava radyasyonu
R_t : Birim zamanda hazneden su bırakma
R_z : Bitkinin kök derinliği

SEE	: Tahminin standart hatası
SH	: Hazneden veya hazneye sızma
s_j	: j-inci ayda akımların standart sapması
S_t	: t periyodunda haznede depolama miktarı
SWA_i	: Aktüel toprak su miktarı
T	: Havanın ortalama sıcaklığı
t	: Zaman
T_a	: Aktüel transpirasyon
TAW	: Kök bölgesinde toplam kullanılabilir toprak suyu
T_c	: Bitki transpirasyonu
TEW	: Toprak üst tabakasından buharlaşabilecek maksimum su derinliği
T_m	: Maksimum transpirasyon
TSTO	: Haznede yıllık biriken kullanılabilir suyun miktarı
T_t	: Dönem boyunca hazneden çekilmesi hedeflenen su miktarı
T_x	: Sıcaklık aksının tutması
u	: Aylık bitki su ihtiyacı
u_2	: Yerden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı
UB_i	: Birim alanda birim verimden elde edilen fayda
UC_i	: Birim alanda birim verimin maliyeti
UCW_i	: Birim alanda birim verime karşılık gelen sulamanın maliyeti
$UNF_{i,j}$	: Birim alandan birim sulamaya karşılık alınan net fayda
W	: Sıcaklık ve kota bağlı dengeleme faktörü
W_f	: Rüzgar fonksiyonu
WP_i	: Solma noktasında toprak su miktarı
X	: Hazneye giren akımlar
Y	: Verim
Y_a	: Gerçek verim
Y_m	: Maksimum verim
Y_t	: Dönem boyunca hazneden çekilebilen su miktarı
z	: Zemin kotu
z_{1i}, z_{2i}	: Standart normal rasgele değişkenler
Z_e	: Buharlaşmayla maruz kalan toprak üst tabakasının derinliği
Δ	: Doymuş buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimi
ΔR_z^{t+1}	: t+1 periyodunda kök derinliğinin t periyodundaki kök derinliğine farkı
ΔSM	: Toprak suyundaki değişim miktarı
$\Delta\theta^{t+1}$	: ΔR_z^{t+1} kök derinliği bölgesindeki zeminin nemi
α	: Albedo oranı
α_d	: Düzenleme oranı
α_k	: Haznedeki suyu tarlada kullanım randımanı
β	: Verim azaltma faktörü,
β_{sk}	: Su kullanılabilirlik ve kök yoğunluğunun etkileri arasındaki ağırlık faktörü
δ	: Güneş batışı açısı
ε_{ij}	: Bağımsız değişken
γ	: Psikrometrik sabit
η_{1i}, η_{2i}	: 0 ile 1 arasında üniform dağılmış rasgele sayılar
φ	: enlem
λ	: Suyun buharlaşma ısısı

λ_i : i. evrede bitkinin su stresine karşı hassasiyetini ifade eden ağırlık faktörü

μ_e : Türetilmek istenilen bağımsız ε_{ij} değişkeninin ortalaması

θ : Toprak nem muhtevası

θ_{FC} : Tarla kapasitesinde toprak nem muhtevası

θ_g^t : t periyodunda tüketilmesine izin verilen toprak nem muhtevası

θ_m : Dikkate alınan periyot başında toprak nem muhtevası

θ_F : Dikkate alınan periyot sonunda toprak nem muhtevası

$\theta_s(p_b)$: Stres noktasında toprak su muhtevası

θ_{WP} : Sürekli solma noktasında toprak nem muhtevası

ρ_{1j} : j-1 ve j-inci aylar arasındaki otokorelasyon katsayısı

ρ_a : Havanın yoğunluğu

σ : Stefan-Boltzmann sabiti

σ_e : Bağımsız ε_{ij} değişkeninin standart sapması

ω : Güneş batım saati açısı

SULAMA AMAÇLI BİR BARAJIN OPTİMUM İŞLETME MODELİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Su bitki üretimi için temel bir ihtiyaçtır. Sınırlı su kaynaklarını optimum şekilde kullanarak ürün ve randımanı artırmak, su mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Bu çalışmada, sulama amaçlı bir haznenin sahasında muhtelif sayıda ekilen bitkilerden maksimum net faydayı elde etmek için suyun optimum dağıtılması problemi incelenmiştir.

Bu çalışmada bitki kök ve gövde gelişimi lineer, toprak porozitesi homojen, toprak nemi dinamik, meteorolojik veriler deterministik, hidrolojik veriler ise stokastik olarak dikkate alınmıştır.

Ne zaman, nerede, ve ne kadar suya ihtiyaç olduğunu tespit eden ve mevcut suyu optimum şekilde dağıtan bir ***SULAMA*** modeli geliştirilmiştir. Bu modelde ilk önce yıllık mevcut su kapasitesiyle maksimum net faydayı verecek optimum bitki deseni belirlenmektedir. Daha sonra günlük toprak nemi dengesi kullanılarak günlük sulama ihtiyaçları belirlenmektedir. Yeterli su potansiyeli durumlarında tam sulama programı belirlenmektedir. Yetersiz su potansiyeli durumunda ise, sezon içinde maksimum net faydayı elde etmek için optimum su dağıtım programı dinamik programlama tekniğinden faydalanılarak yapılmaktadır. Sulama kısıntı oranları, hangi bitkinin hangi büyüme evresinde olacağı, klasik metotlardan farklı olarak dinamik olarak geliştirilen bir yöntemle belirlenmektedir. Bu metotta, sulama kısıntı oranları önceden tayin edilmemekte ve sabit alınmamaktadır.

SULAMA modelinde, karar aralıkları günlük olarak seçilirken sulama aralıkları dinamik olarak belirlenmektedir. Toprak nem dengesi dinamik yapı gösterdiği için muhtemel her bir kısıntı oranı için senaryolar geliştirilmiştir. Maksimum net faydayı veren her bir bitkinin büyüme aşamalarındaki optimum kısıntı oranları belirlenmiştir. Bir bitkinin aynı kısıntı değerine karşılık birden fazla çözüm varsa, verimi en büyük yapan kısıntı oranları seçilmiştir. Bütün bu işlemler sadece bir bitki için 1 336 336 adet senaryo izlenerek verimi en yüksek yapan kısıntı değerleri bulunmuştur. Her bir senaryoda ekimden hasada kadar, günlük karar aralıkları ile dinamik sulama suyu ihtiyaçları hesaplandığından, optimizasyon sonucunda elde edilen çözüm bir bitkinin sezon boyunca sulama zaman ve miktarlarını vermektedir.

Bu çalışmada, FAO Penman-Monteith Metodu referans bitki evapotranspirasyonunu (ET_0) hesaplamak için kullanılmıştır. Bu metot 0.12 m üniform yüksekliğinde, 70 sm^{-1} lik bir yüzey direnci ve 0.23 albedosu olan aktifce büyüyen ve yeterli sulanan bir yeşil çayır yüzeyinden olacak ET'yi temsil eden hipotetik bir bitki alınarak geliştirilmiştir. FAO Penman-Monteith metodu ile referans evapotranspirasyon aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$ET_0 = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}\, u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\, u_2)} \quad (1)$$

Burada, ET_0 referans evapotranspirasyon (mm/gün), Δ doymuş buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/^{0}C), R_n bitki yüzeyindeki net radyasyon (MJ m^{-2} /gün), G toprak ısı akımı yoğunluğu (MJ m^{-2} /gün), γ psikrometrik sabit (kPa/^{0}C), T yerden 2 m yükseklikteki hava sıcaklığı (^{o}C), u_2 yerden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı (m/s), e_s günlük ortalama sıcaklıkta doymuş buhar basıncı (kPa), e_a havanın ortalama gerçek buhar basıncıdır (kPa).

Bitki evapotranspirasyonu ET_0'nun bitki katsayısı K_c ile çarpılmasıyla hesaplanabilir. K_c katsayısı bitki karakteristikleri ile toprak yüzeyinden buharlaşmanın ortalama etkilerini kapsamaktadır. Bitki katsayısı (K_c) iki ayrı katsayıya, birisi bitki transpirasyonu için temel bitki katsayısı (K_{cb}) ve diğeri toprak buharlaşması için (K_e) katsayısına ayrılmaktadır. Ayrıca toprak su stresi şartlarında, toprak su stresinin etkisi, temel bitki katsayısı bitki stres katsayısı ile çarpılarak ifade edilir. Gerçek bitki evapotranspirasyonu (ET_a) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$ET_a = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (2)$$

Bitkiler teorik olarak *tarla kapasitesi* (θ_{FC}) ile *solma noktası* (θ_{WP}) arasındaki mevcut su muhtevasını (θ_{FC}-θ_{WP}) kullanabilirler. Her ne kadar solma noktasına kadar toprak suyunun tamamı teorik olarak bitkiler için kullanılabilir olsa da, toprak su muhtevası solma noktasına düşmeden çok önce bitki su çekimi azalır. Toprak su muhtevası belirli bir değerin altına düştüğü zaman, bitkinin evapotranspirasyonu potansiyel evapotranspirasyonun altına düşer. Bitkinin su stresine girmeden kök bölgesinden çekebileceği mevcut su muhtevası şöyle hesaplanabilir:

$$p_b(\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (3)$$

Burada, p_b toplam kullanılabilir toprak suyunun bitki strese girmeden çekilebilir kısmı. p_b değeri bitki ve toprak cinsine ve bitkinin potansiyel evapotranspirasyonuna bağlı olarak değişir.

Bitkinin su stresine girdiği andaki toprak su muhtevasını *stres noktası* ($\theta_s(p_b)$) diye tanımlarsak, tarla kapasitesi (θ_{FC}) ile stres noktası ($\theta_s(p)$) arasındaki toprak su muhtevasına da güvenli faydalı kapasite diyebiliriz. Buna göre stres noktası ($\theta_s(p_b)$) aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$\theta_s(p_b) = \theta_{FC} - p_b(\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (4)$$

Toprak su muhtevası, stres noktasına ($\theta_s(p_b)$)'e düşene kadar su stresi katsayısı (K_s) 1'e eşittir. Toprak su muhtevası $\theta_s(p_b)$'in altına düşerse, su stresi katsayısı (K_s) şu şekilde hesaplanabilir:

$$K_s = \frac{\theta_i - \theta_{WP}}{\theta_s(p_b) - \theta_{WP}} \qquad \theta_i < \theta_s(p_b) \quad (5)$$

$$K_s = 1 \qquad \theta_i \geq \theta_s(p_b) \quad (6)$$

Burada, θ_i= i. günde kök bölgesinde toprak suyu muhtevasıdır.

Bu çalışmada hazne giriş akımları 1. mertebe Markov modeli (AR(1)) olan Thomas-Fiering modeli ile üretilmiştir. AR(1) modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y_{ij} = \rho_{1j} y_{i,j-1} + \varepsilon_{ij} \tag{7}$$

Burada, i ve j indisleri sırasıyla yılları ve ayları temsil etmektedir, $y_{ij} = \frac{x_{ij} - \overline{x}_j}{s_{xj}}$ ile dönüştürülen değişken, ρ_{1j} j-1 ve j-inci aylar arasındaki otokorelasyon katsayısı, ε_{ij} bağımsız değişken, x_{ij} i. yılın j. ayındaki akım, $\overline{x}_j$ aylık ortalama akım ve s_{xj} aylık akımların standart sapmasıdır.

Kök bölgesinde mevcut toprak nemi stres noktasının veya güvenli tüketilebilir toprak neminin altına düşmesi durumunda, toprağa tarla kapasitesine ulaşacak kadar su verilir. Buna göre bir t periyodunda bir bitkinin su ihtiyacı IRR^t şöyle bulunur:

$$\theta_g^t = (1 - KKO_L/2)[\theta_s(p_b)] \tag{8a}$$

$$\theta_m^t > \theta_g^t \rightarrow IRR^t = 0 \tag{8b}$$

$$\theta_m^t \le \theta_g^t \rightarrow \quad IRR^t = (1 - KKO_L/2)\left[(\theta_{FC} R_z^t - (\theta_m^t R_z^t + P_e^t))\right] \tag{8c}$$

Burada, θ_g^t t periyodunda tüketilmesine izin verilen toprak nem muhtevası, KKO_L kısıntılı sulama durumunda L büyüme aşamasında kısıntı kontrol oranı, yeterli sulama durumunda ise sıfıra eşit, θ_m^t t periyodunda ortalama başlangıç nemi, IRR^t t periyodunda bitkinin sulama suyu ihtiyacı, R_z^t t periyodunda bitkinin kök deriliği, P_e^t t periyodunda etkili yağıştır. Toprak nemi muhtevası θ_m^t sezon başında tarla kapasitesine eşit kabul edilir ve ondan sonra her adımda aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\theta_F^t R_z^t = \theta_m^t R_z^t + P_e^t + IRR^t - ET_a^t \tag{9a}$$

$$\theta_m^{t+1} = \min\left(\frac{\theta_F^t R_z^t + \Delta\theta^{t+1} \Delta R_z^{t+1}}{R_z^{t+1}}, \theta_{FC}\right) \tag{9b}$$

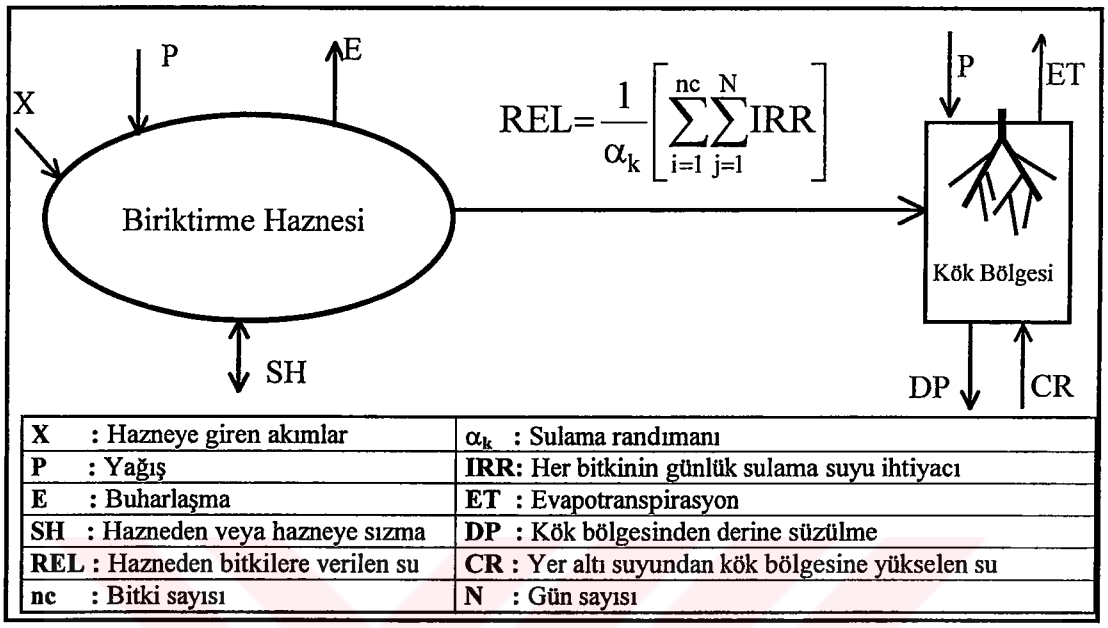
Burada, θ_F^t t periyodu sonunda zemin nemi, ET_a^t t periyodunda gerçek evapotranspirasyon (mm), $\Delta\theta^{t+1}$ t ile t+1 periyotları arasında artan birim kök derinliğindeki (ΔR_z^{t+1}) zeminin nemidir.

Önerilen model birisi suyu talep eden bitki kök bölgesi ile diğeri suyu arz eden biriktirme haznesi olmak üzere iki farklı kontrol hacmini birbirine entegre etmektedir. Biriktirme haznesi ile kök bölgesi arasındaki entegrasyon Şekil (1)'de gösterilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen modelin amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$G_f = \max \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{nc} \left[1 - K_{yi,j}\left(1 - \frac{ET_{ai,j}}{ET_{mi}}\right)\right] Y_{m_i} (UB_i - UC_i - UWC_i) AREA_i \tag{10}$$

Burada, G_f sistemin optimum beklenen değeri, K_y verim duyarlılık faktörü ET_a gerçek evapotranspirasyon (mm), ET_m maksimum evapotranspirasyon (mm), Y_m

maksimum verimdir (kg/da), $UNF_{i,j}$ birim alandan birim sulamaya karşılık alınan net faydadır (fayda/da/mm), UB_i birim alanda birim verimden elde edilen fayda, UC_i birim alanda birim verimin maliyeti, UCW_i birim alanda birim verime karşılık gelen sulamanın maliyeti, $AREA_i$ her bir bitkinin ekim alanıdır (da).



X : Hazneye giren akımlar	α_k : Sulama randımanı
P : Yağış	**IRR**: Her bitkinin günlük sulama suyu ihtiyacı
E : Buharlaşma	**ET** : Evapotranspirasyon
SH : Hazneden veya hazneye sızma	**DP** : Kök bölgesinden derine süzülme
REL : Hazneden bitkilere verilen su	**CR** : Yer altı suyundan kök bölgesine yükselen su
nc : Bitki sayısı	**N** : Gün sayısı

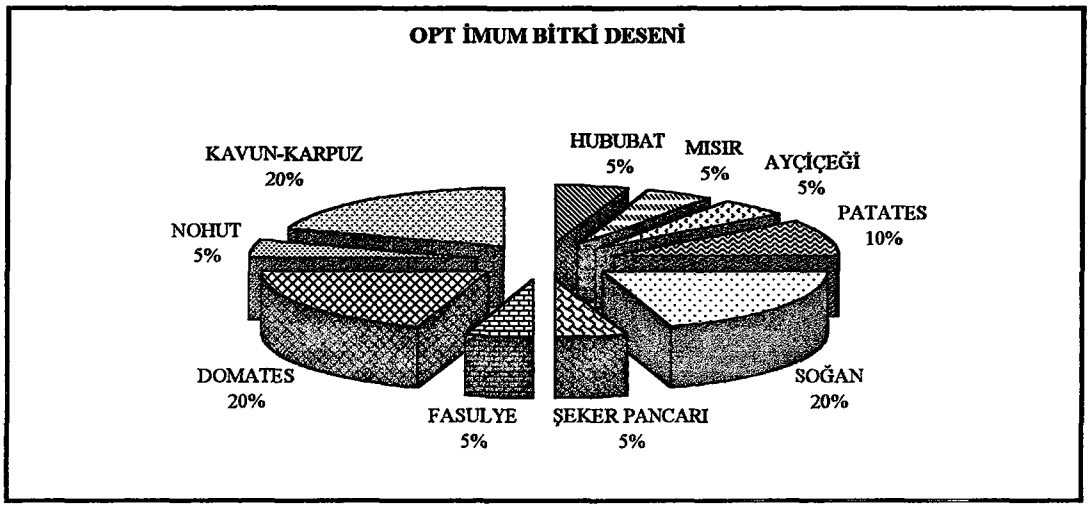
Şekil 1. Biriktirme Haznesi İle Kök Bölgesi Arasındaki Entegrasyon

Modelin uygulanabilirliği Çavdarhisar Barajında (Kütahya-Türkiye) yapılan bir çalışma ile gösterilmiştir. Kütahya bölgesinde yaygınca yetiştirilen hububat, mısır, ayçiçeği, patates, soğan, şeker pancarı, fasulye, domates, nohut ve kavun-karpuz ekilmek için seçilmiştir. Fayda-maliyet hesapları için bitkilerin 1998 birim fiyatları değerleri kullanılmıştır.

Optimum bitki deseni *tam sulama, az su tüketen bitkilerin alanı artırılıp tüm alanda tam sulama, eksik sulama ve kuru tarım+tam sulama* olmak üzere 4 durumda araştırılmıştır. Bütün durumlar tek tek incelendikten sonra en yüksek net faydayı veren eksik sulama durumundaki bitki deseni optimum olarak seçilmiştir. Ortalama yıl için optimum bitki deseni Şekil (2)'de görülmektedir. Kavun-karpuz, domates ve soğan % 20 ile en büyük ekim oranını alırken, patates % 10 ekim oranı ile bitki deseninde yer almıştır. Diğer tüm bitkiler ise % 5 ile en düşük oran seviyesinde bitki deseninde yer almıştır.

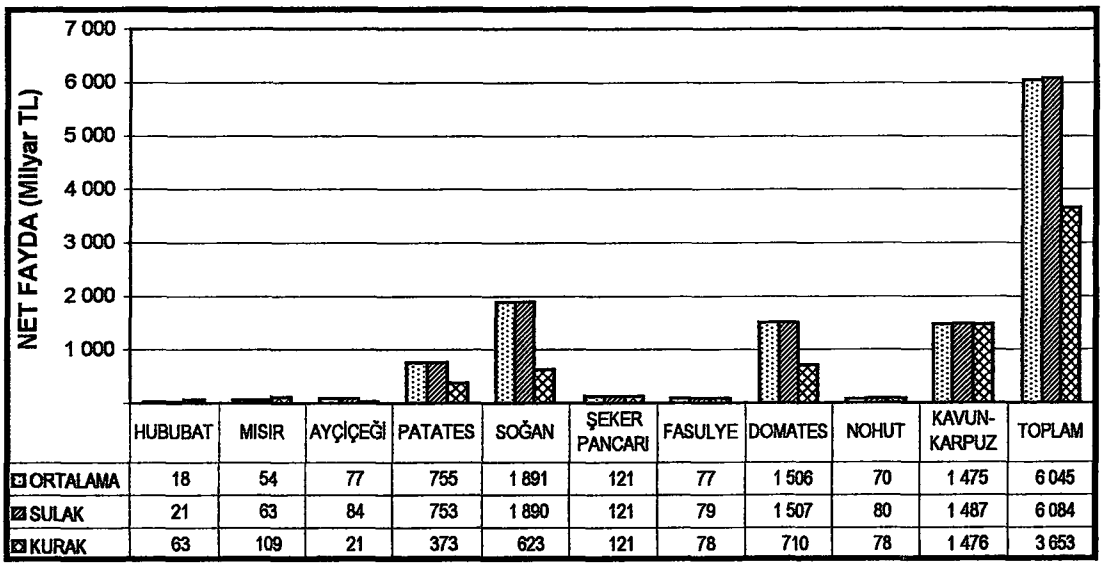
Sulak yılda, tam sulama şartlarında optimum bitki deseni, ortalama yılda gerçekleşen oranlarda elde edilmiştir. Kurak yılda ise, net faydası en düşük ilk üç bitki kuru tarım ve diğerleri tam ve kısıntılı sulama şartlarında optimum bitki deseni elde edilmiştir. Buna göre, hububat ve kavun-karpuz % 20, mısır % 19, domates % 9 soğan % 7 ve diğer bitkiler % 5 oranında bitki deseninde yer almıştır.

Her bir bitki deseni için optimum su dağıtım programı ve hazneden çekilecek günlük su miktarları belirlenmiştir. Ortalama, sulak ve kurak yıllarda bütün bitkiler için toplam verimler bulunmuştur. Belirli bir bitkinin ortalama, sulak ve kurak yıllardaki verimleri birbiriyle kıyaslanırken her durumdaki bitki ekim alanları dikkate alınmalıdır. Buğday için ortalama, sulak ve kurak yıllarda ürün miktarları sırasıyla 1139, 1232, ve 4235 tondur. Domates için ortalama, sulak ve kurak yıllarda ürün miktarları sırasıyla 29431, 29449, ve 13867 tondur.



Şekil 2. Optimum Bitki Deseni (Ortalama Yıl)

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda elde edilen toplam net faydalar 1998 yılı fiyatlarıyla sırasıyla 6.045, 6.084 ve 3.653 trilyon TL (sırasıyla 22.8, 22.96, 13.8 milyon dolar) olarak elde edilmiştir (Şekil 3). Kısıntılı sulamanın yapıldığı ortalama yılda sulama suyu hacminin sulak yıla göre % 11.4 eksik olmasına rağmen aynı bitki deseninden elde edilen toplam net faydadaki eksiklik yapılan optimum dağıtımla % 1 civarındadır. Birim net faydası yüksek olan domates, kavun-karpuz ve soğan gibi bitkiler, birim net faydası düşük olan hububat, mısır ve ayçiçeği gibi bitkilere göre ekim alanları dört kat büyük olurken, net faydaları 20 ile 100 kat arasında büyük gerçekleşmiştir. Domates, kavun-karpuz ve soğanın net faydalarının toplamı, toplam net faydanın % 80'ini oluşturmaktadır. Kurak yılda, sulak yıla göre su potansiyelinde % 50 azalma olduğundan, sulama suyu ihtiyacı ve net faydası düşük olan bitkilerin alanları bitki deseninde artırılmıştır. Bunun sonucunda ise toplam net faydada % 40 bir azalma olmuştur.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ	TOPLAM
ORTALAMA	18	54	77	755	1 891	121	77	1 506	70	1 475	6 045
SULAK	21	63	84	753	1 890	121	79	1 507	80	1 487	6 084
KURAK	63	109	21	373	623	121	78	710	78	1 476	3 653

Şekil 3. Gerçekleşen Toplam Net Fayda Miktarları

Sonuç olarak, yeterli ve yetersiz su potansiyeli durumunda, muhtelif bitkilerden maksimum net faydayı elde etmek için haznedeki mevcut suyun optimum dağıtım programı belirlenmiştir.

DETERMINATION OF OPTIMAL OPERATION MODEL FOR AN IRRIGATION RESERVOIR

SUMMARY

Water is an essential requirement for crop production. Increasing yield and efficiency in an optimal manner through use of limited water resources is one of the most important subjects in water engineering. In this study, to attain maximum net benefit from multiple crops planted in a field for an irrigation reservoir, optimal water allocation problem was studied.

For this study, it is assumed that plant root and body growth are linear; soil porosity is homogeneous; soil moisture is dynamic; meteorological data is deterministic; and hydrologic data is stochastic.

A model called ***SULAMA*** was developed to determine where, when, and how much water is needed and to optimally allocate available water. In this model at the beginning, optimum crop pattern is determined to attain maximum net benefit with annually available water capacity. Henceforth, daily irrigation requirement is determined by using daily soil water balance. Under adequate water potential conditions full irrigation scheduling is determined. Under inadequate water potential conditions, optimal water allocation scheduling in a season is determined to attain maximum net benefit by using soil water balance and dynamic programming. Irrigation deficit ratios for growth stages of a specific crop are determined by a method that is dynamically developed and different from classical methods. In this method, irrigation deficit ratios are not pre-determined and taken as constant values.

In the SULAMA model, when daily decision intervals are selected, irrigation intervals are dynamically determined. Since soil moisture shows dynamic structure, various scenarios were developed for probable deficit ratios. Optimum deficit ratios in the growth stages of each crop were determined for giving the maximum net benefit. When there are multiple solutions for the same deficit value of a crop, the ratios giving the highest net benefit are chosen. For all these calculations, deficit values giving the highest benefit were calculated tracing 1 336 336 scenarios for each crop. In each scenario, since dynamic irrigation requirements using daily soil moisture balance are calculated from the planting to the harvest, solution obtained for optimum allocation is the solution for irrigation time and quantity through season.

In this study, FAO Penman-Monteith Method is used for reference crop evapotranspiration (ET_0) determination. This method was developed by defining the reference crop as a hypothetical crop with an assumed height of 0.12 m, with a surface resistance of 70 sm^{-1} and an albedo of 0.23, closely resembling the evaporation from an extensive surface of green grass of uniform height, actively growing and adequately watered. FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration can be computed as:

$$ET_0 = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}\, u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\, u_2)} \quad (1)$$

Where, ET_0 is reference evapotranspiration (mm/day), Δ is slope vapor pressure curve (kPa/^{0}C), R_n is net radiation at the crop surface (MJ m^{-2} /day), G is soil heat flux density (MJ m^{-2} /day), γ is psychrometric constant (kPa/^{0}C), T is mean daily air temperature at 2 m height (^{o}C), u_2 is wind speed at 2 m height (m/s), e_s is saturation vapour pressure (kPa), and e_a is actual vapour pressure (kPa).

Crop evapotranspiration can be calculated by multiplying ET_0 by the crop coefficient K_c. The K_c coefficient incorporates crop characteristics and averaged effects of evaporation from soil. The crop coefficient (K_c) is splited into two separate coefficients, one for crop transpiration, i.e., the basal crop coefficient (K_{cb}), and one for soil evaporation (K_e). Furthermore, under soil water stress conditions, the effect of soil water stress is described by multiplying the basal crop coefficient by the water stress coefficient. Actual crop evapotranspiration can be calculated as following:

$$ET_a = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (2)$$

Crops can theoretically use the available water content (θ_{FC}-θ_{WP}) between field capacity (θ_{FC}) and wilting point (θ_{WP}). Although water is theoretically available until wilting point, crop water uptake is reduced well before wilting point is reached. When the soil water content drops below a threshold value, crop evapotranspiration drops below potential evapotranspiration. The readily available water content that a crop can extract from the root zone without suffering water stress can be calculated as:

$$p_b(\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (3)$$

Where, p_b is average fraction of total available soil water that can be depleted from the root zone before moisture stress. The factor p_b differs from one crop to another and changes depending on soil type and crop ET values.

When crop reaches water stress, soil water content can be defined as *stress point ($\theta_s(p_b)$)*. Soil water content between field capacity (θ_{FC}) and stress point ($\theta_s(p_b)$) can be defined as safe depleting capacity. Thus, stress point ($\theta_s(p_b)$) can be calculated as:

$$\theta_s(p_b) = \theta_{FC} - p_b(\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (4)$$

Until soil water content drops the stress point, $\theta_s(p_b)$, the water stress coefficient, K_s equals 1. When soil water content drops below the stress point, water stress coefficient, K_s can be calculated as:

$$K_s = \frac{\theta_i - \theta_{WP}}{\theta_S(p_b) - \theta_{WP}} \qquad \theta_i < \theta_s(p_b) \quad (5)$$

$$K_s = 1 \qquad \theta_i \geq \theta_s(p_b) \quad (6)$$

Where, θ_i is soil water content on day i.

In this study, reservoir inflows were generated by Thomas-Feiring model which is the first order Markov (AR(1)) model. AR(1) model can be written as:

$$y_{ij} = \rho_{1j} y_{i,j-1} + \varepsilon_{ij} \tag{7}$$

Where, i ve j are indexes representing years and months, respectively, $y_{ij} = \frac{x_{ij} - \overline{x}_j}{s_{xj}}$ variable, ρ_{1j} is the autocorrelation coefficient between j-1th and jth months, ε_{ij} is independent variable, x_{ij} is the inflow in jth month of ith year, $\overline{x}_j$ is the average monthly inflow, and s_{xj} is the standard deviation of monthly inflows.

When available soil moisture content in the root zone is below stress point or safe depleting capacity, the soil moisture is raised to the field capacity. Thus, irrigation requirement of a crop during period t, IRR^t is given by:

$$\theta_g^t = (1 - KKO_L/2)[\theta_s(p_b)] \tag{8a}$$

$$\theta_m^t > \theta_g^t \rightarrow IRR^t = 0 \tag{8b}$$

$$\theta_m^t \le \theta_g^t \rightarrow \quad IRR^t = (1 - KKO_L/2)\left[(\theta_{FC} R_z^t - (\theta_m^t R_z^t + P_e^t))\right] \tag{8c}$$

Where, θ_g^t is the soil moisture content allowed for depleting in period t, KKO_L is the deficit control ratio for L growth stage of a crop under inadequate water supply, zero under adequate water supply, θ_m^t is the average initial soil moisture content in period t, IRR^t is the irrigation requirement in period t, R_z^t is the root depth of a crop in period t, and P_e^t is the effective rainfall in period t. Initially soil water content, θ_m^t is assumed to be equal to field capacity, and in the following periods it can be calculated by:

$$\theta_F^t R_z^t = \theta_m^t R_z^t + P_e^t + IRR^t - ET_a^t \tag{9a}$$

$$\theta_m^{t+1} = \min\left(\frac{\theta_F^t R_z^t + \Delta\theta^{t+1} \Delta R_z^{t+1}}{R_z^{t+1}}, \theta_{FC}\right) \tag{9b}$$

Where, θ_F^t is the soil moisture content at the end of period t, ET_a^t is the actual ET in period t, and $\Delta\theta^{t+1}$ is the soil moisture in increment root zone (ΔR_z^{t+1}) between period t and t+1.

The proposed model integrates two control volumes, one is the root zone demanding water and the other is the reservoir supplying water. The integration between reservoir and root zone is demonstrated in Figure (1).

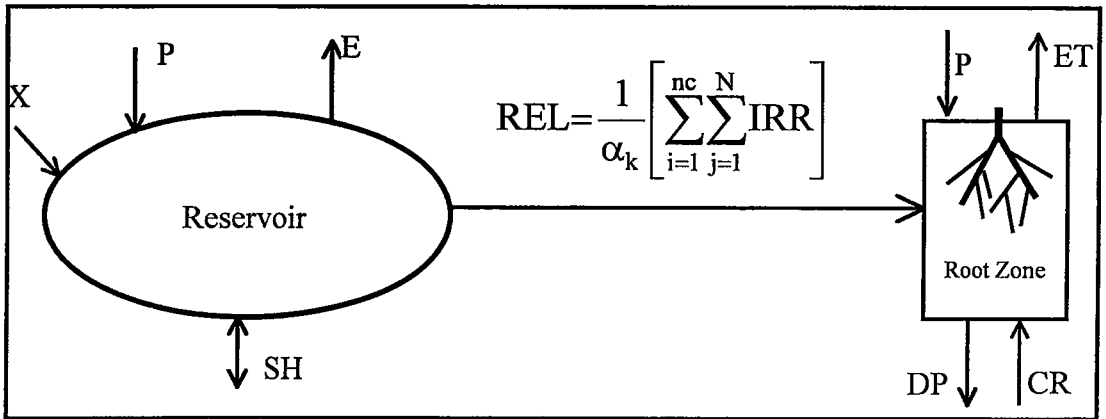
The objective function of the model developed in this study is given by,

$$G_f = \max \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{nc} \left[1 - K_{yi,j}\left(1 - \frac{ET_{ai,j}}{ET_{mi}}\right)\right] Y_{m_i} (UB_i - UC_i - UWC_i) AREA_i \tag{10}$$

where, G_f is the optimum expected value of the system, K_y is the yield sensitive factor, ET_a is the actual evapotranspiration (mm), ET_m is the potential

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

evapotranspiration (mm), Y_m is the maximum yield (kg/da), UB_i is the benefit of unit yield in unit area, UC_i is the unit cost of unit yield in unit area, UCW_i is the unit cost of water of unit yield in unit area, and $AREA_i$ is the crop area.



X : Reservoir inflows	α_k : Irrigation efficiency
P : Rainfall	**IRR:** Irrigation requirement
E : Evaporation	**ET** : Evapotranspiration
SH : Seepage from or into reservoir	**DP** : Deep percolation
REL : Release from reservoir for crops	**CR** : Capillary rise from groundwater table
nc : Number of crops	**N** : Number of days

Figure 1. The Integration Between Reservoir and Root Zone

The applicability of the model is demonstrated through a case study of Çavdarhisar reservoir in Kütahya-Turkey. From the crops commonly grown in the area, wheat, maize, sunflower, potato, onion, sugar beet, beans, tomato, chickpea, and melon-watermelon were selected to be planted. The unit benefit and cost values of crops in 1998 were used for benefit-cost calculations.

Optimum crop pattern is investigated in four situations such as adequate irrigation, adequate irrigation in full area increasing crop areas requiring less water, deficit irrigation, and nonirrigated + adequate irrigation. After all situations are examined one by one, the crop pattern in the situation giving the highest net benefit is selected as the optimum. In average year, the optimum crop pattern is shown in Figure (2). Melon-watermelon, tomato, and onion with 20 % and potato with 10 % are involved in crop pattern. Others with 5 % are involved in crop pattern as the lowest percent level.

In rainy year, the optimum crop pattern under adequate water supply is the same as the average year. In drought year, the optimum crop pattern is found in the first three crops that have least net benefit under nonirrigated situation and others under adequate water supply. Thus, wheat and melon-watermelon, maize, tomatoes, onion, and others with 20, 19, 9, 7, and 5 %, respectively are involved in the optimum crop pattern.

The optimum water allocation for each crop and daily reservoir release quantities were determined. Total yields for all crops in average, rainy, and drought years are found. When yields of a specific crop in average, rainy, and drought years are compared with each other, crop areas for each situation should be taken into consideration. Crop yields for wheat are 1139, 1232, and 4235 tons in average, rainy, and drought years, respectively. Crop yields for tomato are 29431, 29449, and 13867 tons in average, rainy, and drought years, respectively.

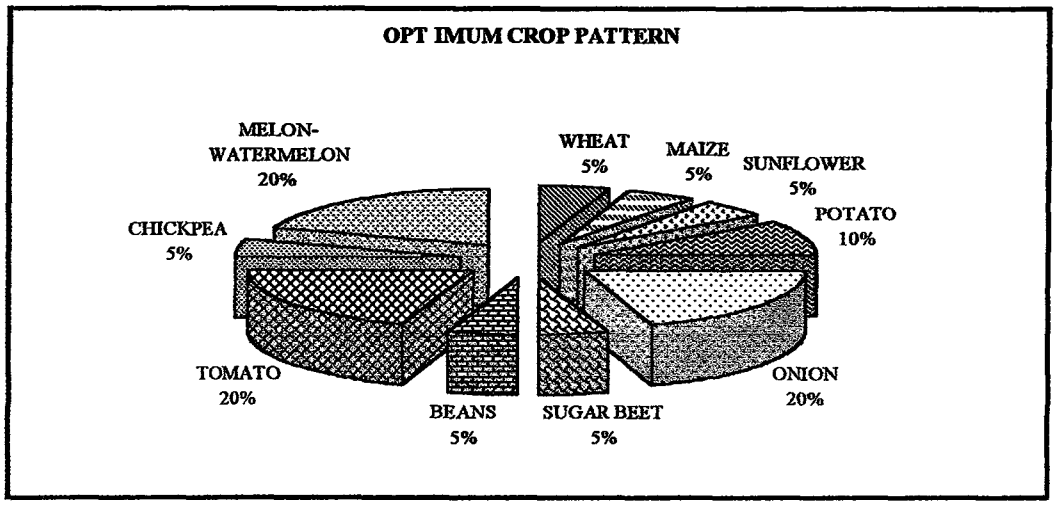
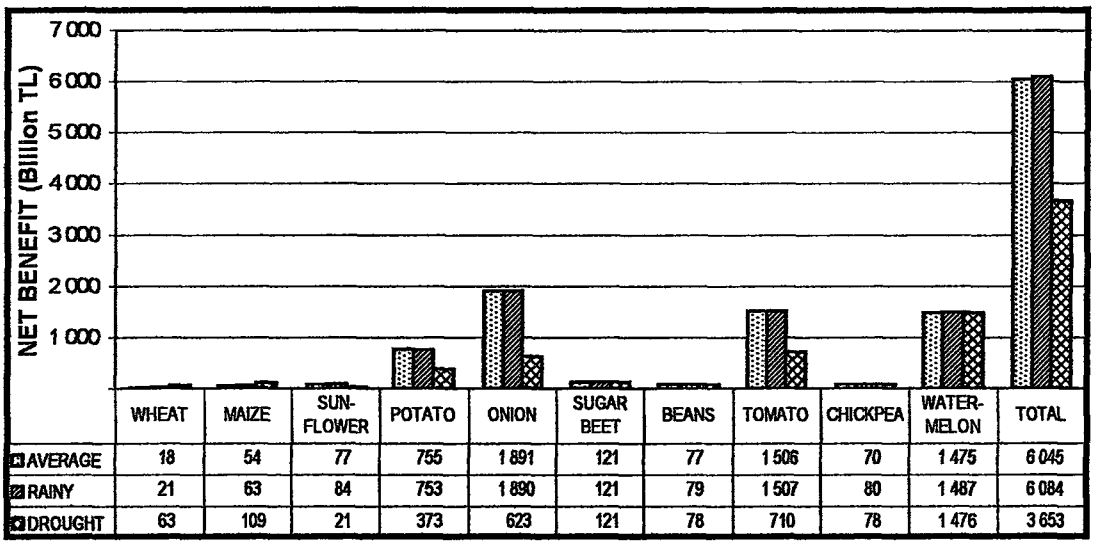


Figure 2. Optimum Crop Pattern (Average Year)

In average, rainy, and drought years, the total net benefits are respectively 6.045, 6.084 and 3.653 trillion Turkish Liras (22.8, 22.96, and 13.8 million dollars respectively) for 1998 unit benefit-cost values (Figure 3). Although water supply under deficit irrigation in average year is 11.4 % less than that in rainy years, the deficiency of the total net benefit in the same crop pattern is only about % 1 by using optimum allocation. The planted areas of the crops that have the highest unit net benefit such as tomatoes, melon-watermelon, and onion are four times greater than those that have the lowest unit net benefit such as wheat, maize, and sun flower, however, their net benefits are 20-100 times greater. Total net benefits of tomato, melon-watermelon, and onion constitute 80 % of the total net benefit. Since water supply in drought year is 50 % less than those in rainy year, the planted areas of the crops requiring less water and having less net benefit were increased in the crop pattern. Therefore, there was a 40 % decrease in the total net benefit.



	WHEAT	MAIZE	SUN-FLOWER	POTATO	ONION	SUGAR BEET	BEANS	TOMATO	CHICKPEA	WATER-MELON	TOTAL
AVERAGE	18	54	77	755	1 891	121	77	1 506	70	1 475	6 045
RAINY	21	63	84	753	1 890	121	79	1 507	80	1 487	6 084
DROUGHT	63	109	21	373	623	121	78	710	78	1 476	3 653

Figure 3. Net Benefits in Average, Rainy, and Drought Years

As a result, under adequate and inadequate water supply, optimum allocation scheduling of available water in the reservoir was determined to attain maximum net benefit from multiple crops.

1. GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Dünyada artan nüfus her yıl daha fazla gıdanın temin edilmesi problemi ile karşı karşıyadır. Mevcut toprak ve su kaynaklarından gıda üretiminin artırılması metotlarından birisi ve de kurak ve yarı kurak bölgelerde en önemlisi sulama yapmaktır.

Sınırlı su kaynakları evsel, endüstriyel ve tarımsal kullanımlar arasında paylaşılmakta olduğundan, artan nüfus her yıl tarımsal kullanımın payını sürekli azaltmaktadır. Sulu tarımı su sıkıntısı ile birlikte devam ettirmek için yeni yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Bunlardan en önemlisi sınırlı su kaynaklarını optimum şekilde verimli ve idareli kullanarak kısıtlı sulama ile verimi artırmaktır.

Su bitki üretimi için temel bir ihtiyaçtır. Kaliteli uygun ürün ve yüksek verim elde etmek için, farklı büyüme şartları altında bitki gelişimi ve veriminde sulamanın etkisinin ortaya konarak incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, su kaynağı kısıtlı olsun veya olmasın onu en verimli şekilde sulama noktasına ulaştırmak su mühendisliğinin en önemli konularından biridir.

Bu çalışmada, sulama amaçlı bir haznenin sulama sahasında ekilen çeşitli bitkilerden maksimum net faydayı elde etmek için suyun optimum dağıtılması problemi incelenmiştir. Ne zaman, nerede, ve ne kadar suya ihtiyaç olduğunu tespit eden ve mevcut suyu optimum şekilde dağıtan bir ***SULAMA*** modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu modelde önce yıllık mevcut su kapasitesiyle maksimum net faydayı verecek optimum bitki deseni belirlenmektedir. Daha sonra günlük toprak nemi dengesi kullanılarak günlük sulama ihtiyaçları belirlenmekte ve yetersiz su potansiyeli olması durumunda ise suyun optimum şekilde dağıtımı yapılmaktadır.

1.2 Çalışmanın Konusu ve Amacı

Hidrolojik çevrim içerisinde yer alan evapotranspirasyon (buharlaşma+terleme) ve toprak suyu dengesi bu çalışmanın önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Evapotranspirasyon ve toprak nemini ölçüm ve hesaplama metotları son 50 yıl içerisinde oldukça gelişmiştir. Bitki evapotranspirasyonunu hesaplamak için FAO Penman-Monteith metodu seçilmiş, toprak nemi tüketimini belirlemek için ise literarürdeki dinamik toprak su tüketim dengesi modelleri daha da geliştirilerek ve değiştirilerek kullanılmıştır (Allen ve diğ., 1998; Vedula ve Mujumdar, 1992).

Bu çalışmada bitki kök ve gövde gelişimi lineer, toprak porozitesi homojen, toprak nemi dinamik, meteorolojik veriler deterministik, hidrolojik veriler ise stokastik olarak dikkate alınmıştır.

Bu çalışmanın ana amacı, bitki dinamik su tüketimi modelini hazne işletme modeliyle entegre ederek bir sulama sahasında sulama amaçlı bir hazne için optimum işletme modelinin geliştirilmesidir.

Bu çalışmada geliştirilen modelin bilimsel yaklaşımdan taviz vermeden pratiğe uygulanabilir olması gözetilmiştir. ***SULAMA*** modeli için pratiğe dönük olarak giriş verileri oldukça basit bir şekilde belirlenirken, toprak-bitki-atmosfer sürekliliği ilişkilerinin ve bitki gelişim ve davranışının değerlendirilmesinin bilimsel bir yaklaşım ile ortaya konması amaçlanmıştır.

Geliştirilen ***SULAMA*** modelinin iki aşamada optimizasyon yaparak net faydayı maksimize etmesi amaçlanmıştır.

Birinci aşamada, sezon başında o sezon boyunca hazneye gelecek muhtemel su miktarını kullanarak maksimum net faydayı elde edecek bitki deseni belirlenmektedir. İkinci aşamada ise, yeterli su potansiyeli durumunda toprak nemi tüketim dengesi ile sulama programı belirlenmektedir. Yetersiz su potansiyeli durumunda ise, sezon içinde maksimum net faydayı elde etmek için optimum sulama dağıtım programı dinamik programlama tekniğinden faydalanılarak yapılmaktadır. Yetersiz su potansiyeli durumunda, klasik yöntemlerden farklı olarak, sulama kısıntı oranları önceden tayin edilmemekte ve sabit alınmamaktadır. Bunun yerine sulama

kısıntı oranları, hangi bitkinin hangi büyüme evresinde olacağı geliştirilen bir yöntemle dinamik olarak belirlenmektedir.

Dinamik sulama programı modeli içerisindeki en önemli parametreler ET, toprak nemi, yağış, ve dinamik hazne kapasitesi (gelen-çıkan akımlar, buharlaşma, sızma) dır. Hazne giriş akımları için AR(1) modeli kullanılarak stokastik olarak üretilen değerler kullanılmaktadır.

Modelde karar aralıkları günlük olarak seçilirken sulama aralıkları dinamik olarak belirlenmiştir. Kısıntı durumunda yapılan kısıntı miktarı yeterli sulama değerleri üzerinden oransal olarak hesaplanmamıştır. Toprak nem dengesi dinamik yapı gösterdiği için muhtemel her bir kısıntı oranı için senaryolar geliştirilmiştir. Aranan kısıntının hangi büyüme aşamasında ne kadar kısıntı oranlarında olduğu, ayrıca aranan değerin birden fazla durumda oluşması halinde verimi en büyük yapan kısıntı oranları seçilmiştir. Bütün bu işlemler sadece bir bitki için 1 336 336 adet senaryo izlenerek verimi en yüksek yapan kısıntı değerleri bulunmuştur. Her bir senaryoda, kısıntılı su miktarı için günlük karar aralıkları ile dinamik sulama suyu ihtiyaçları hesaplandığından, optimizasyon sonucunda elde edilen kısıntı miktarına karşı gelen çözüm bir bitkinin sezon boyunca sulama zaman ve miktarlarını da vermektedir.

Geliştirilen model sulama amaçlı bir baraj olan Çavdarhisar (Kütahya) Barajına uygulanacak ve yeterli ve yetersiz su potansiyelinin olduğu durumlarda, ***SULAMA*** modelinden elde edilen çözümler ortaya konacaktır.

1.3 Çalışmanın Düzeni

Bu bölümde çalışmanın tanımı, amacı ve konusu verilmiştir. Geliştirilen modelin ana elemanları olan Toprak-Bitki-Atmosfer Sistemi, Evapotranspirasyon, Su-Bitki Verimi İlişkileri ve Hazne İşletme Çalışması konuları sırasıyla Bölüm 2, 3, 4 ve 5'de incelenmiştir. Su kaynakları problemlerinin çözümünde önemli bir araç olan Optimizasyon Yöntemleri Bölüm 6'da anlatılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen model Bölüm 7'de verilirken, modelin Çavdarhisar Barajına uygulanması ile ilgili olarak elde edilen sonuçlar Bölüm 8'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Sonuçlar Bölüm 9'da verilmiştir.

2. TOPRAK – BİTKİ – ATMOSFER SİSTEMİ

2.1 Giriş

Toprak yer altı ve yerüstü tesirleriyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimler sonucu mineral ve organik maddelerden meydana gelen, içinde su, hava ve canlılar bulunan yer kabuğunun az veya çok gevşek üst tabakasına denir. Toprak tabakasının kalınlığı birkaç santimetreden 2 metreye kadar değişir. Toprak, bitkiler için ihtiyaçlarını temin ettiği bir depo görevi görür ve yetişmeleri için lüzumlu rutubeti ve besin maddelerini temin eder. Tarım bitkilerinin istenilen şekilde yetişmesi için toprakta belirli miktarda su, hava ve besin maddeleri bulunması gerekir. Yağış olmayan zamanlarda topraktaki eksik rutubet sulamayla belirli zaman aralıklarında toprağa verilir. Şayet topraktaki rutubet bitkilere zarar verecek miktarda olursa o zaman da suni önlemlerle (kurutma metotları) topraktan uzaklaştırılır. Topraktaki eksik besin maddeleri ise gübreleme ile toprağa verilir (Erkek, 1983).

Toprağı karakterize eden en önemli büyüklükler danelerin büyüklüğü ve dağılışı "Toprak Bünyesi", danelerin karşılıklı yerleşme, istiflenme durumları "Toprak Yapısı", içindeki organik madde miktarı, fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Bu büyüklükler yardımıyla toprağın su tutma kapasitesi, geçirgenliği, kapiler su yükselmesi gibi önemli hususlar hakkında bilgi edinilir. Toprağın tarım ve sulamaya elverişli olup olmadığına karar verilir (Erkek, 1983).

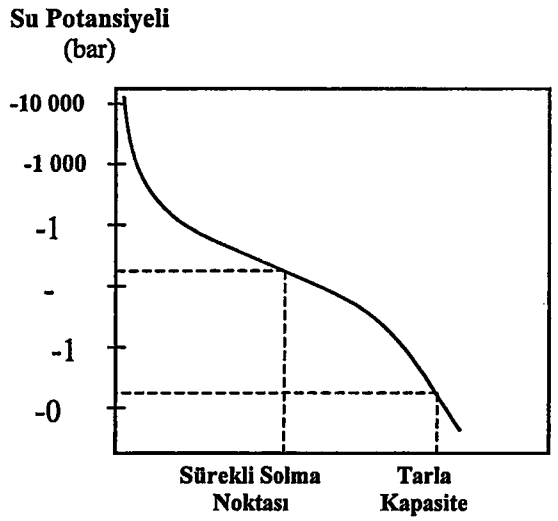
Toprak profilinin sulama ve kurutma yönünden önemini belirtmek için topraklar, "sulak bölge toprakları" ve "kurak bölge toprakları" olmak üzere iki ana grupta ele alınır. Sulak bölgelerde toplam yağış miktarları buharlaşma miktarından daha büyüktür. (Yağış > Buharlaşma). Alt tabakalara sızan sular, organik maddeleri de beraberinde geçirdiğinden, bu tip topraklar besin maddesi yönünden fakir olmakla birlikte, tuz miktarı az olduğundan bunların çoraklaşma tehlikesi yoktur. Kurak bölge topraklarında ise yağış miktarı buharlaşma miktarından küçüktür (Yağış < Buharlaşma). Bu nedenle aşağıya doğru büyük miktarda yıkama olmadığından genel

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

olarak besin maddesi yönünden zengin topraklar olmakla beraber, çoraklaşma tehlikeleri çok büyüktür.

2.2 Toprak Su Tutma Kapasitesi

Toprak-su-bitkiler arasındaki karşılıklı reaksiyonlar en iyi şekilde enerji ilişkileri ile açıklanabilir (Ravina, 1982). Toprak-su sistemlerinin kompleksliği, suyun enerji durumu ve fiziksel şartlarını açıklamak için termodinamik terminolojisinin kullanılmasını gerektiriyor. Toprak-su sistemlerinde bulunan enerji kinetik ve potansiyel enerji olmak üzere iki kısma ayrılır (Thein, 1985; Jensen ve diğ., 1990). Toprak içindeki suyun hareketinin oldukça yavaş olmasından dolayı kinetik enerjinin katkısı ihmal edilebilir. Toprak içinde potansiyel enerjiyle su belirli kuvvetlere karşı hareket edebilir. Bu potansiyel enerji dinamiktir, toprak içinde yerden yere ve zaman içinde değişir. Toprak içindeki suyun potansiyel enerji durumu "bar" (100 kPa) birimi ile açıklanır. Toprak suyu potansiyel enerjisi kuru toprak ile suya doygun toprak için sırasıyla –10000 bar ile 0 arasında değişir. Bitkiler için toprak suyu potansiyel enerjisi –15 ile -1/3 bar (solma noktası ile tarla kapasitesi) arasında elverişlidir. Toprağın suyu tutma ve bitkilere bırakma kapasitesinin tahmini, sulama derinliği ve sıklığının programlanması için gereklidir (Jensen ve diğ., 1990). Tipik bir toprak su tutma eğrisi Şekil (2.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Toprak Su Tutma Eğrisi (Thein, 1985)

2.3 Toprak-Bitki Sisteminde Suyun Hareketi

Transpirasyon dinamik ve sürekli değişen bir işlemdir. Bitki terlerken, su toprak ve bitki köklerinden bitki gövdesine yükselip yapraklarındaki terleme yerlerinden atmosfere su buharı halinde yayılır. Bitki sistemindeki bu akımın miktarı azalan potansiyel enerjinin büyüklüğü ve akım yolundaki su hareketine karşı dirençlerle belirlenir. Bu akım miktarı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$q = \frac{h_s - h_r}{r_s} = \frac{h_r - h_l}{r_p} = \frac{h_s - h_l}{r_s + r_p} \qquad (2.1)$$

Burada,

q= Sistem boyunca akımın miktarı (transpirasyona eşit),

h= Su potansiyeli,

r_s ve r_p = Toprak ve bitkideki akıma karşı direnç,

$_s$, $_r$ ve $_l$ indisleri sırasıyla toprak, kök, ve yaprağı temsil etmektedir.

Toprakta su akımına karşı direnç doğrudan akım yolunun uzunluğuyla doğru orantılıyken, toprağın hidrolik iletkenliği ile ters orantılıdır. Toprak ve bitki dirençleri rölatif önemine göre toprak nem seviyesi veya buharlaşma talebine bağlıdır. Terleme miktarı düşük ve toprak nemli olduğu zaman, *bitkinin direnci* ana akım direnci olması kuvvetli muhtemeldir. Diğer yandan, terleme miktarı yüksek ve/veya toprak kuru olduğu zaman, *toprak direnci* kontrol faktörü olur (Boonyatharokul, 1979).

Toprak-bitki-atmosfer sisteminde, topraktan atmosfere doğru bir su akımı oluştuğunda, sonsuz radyal bir ortamdan bitki köklerine doğru bir akım olduğu kabul edilir. Bu durumda iki boyutlu akım denklemi aşağıdaki gibi yazılır (Jensen ve diğ., 1990).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rD(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \qquad (2.2)$$

Burada,

θ= Hacimsel su muhtevası,

t= Zaman,

r= Kök ekseninden radyal mesafe,

D(θ)= Toprak suyu yayınırlığıdır (yayılma gücüdür). Bu ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$D(\theta) = K(\theta)\frac{\partial h}{\partial \theta} \qquad (2.3)$$

Burada,

K(θ)= Hidrolik iletkenlik,

h= Toprak su potansiyelidir.

Denklem başlangıç ve sınır şartları aşağıdaki gibi olması durumunda şöyle çözülebilir.

$\theta=\theta_0$; $h=h_0$; $t=0$

$$q = 2\pi a K(\theta)\frac{dh}{dr} \qquad (2.4)$$

Burada,

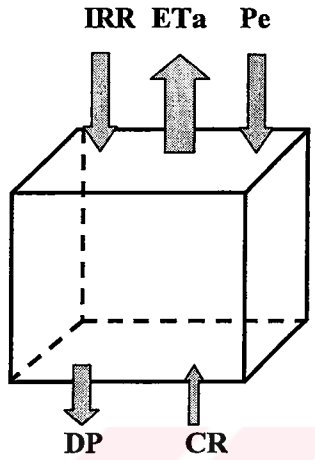
q= Bitkinin birim zamanda birim kök uzunluğundan su çekim miktarı (hacim olarak),

a= Kök çapıdır.

Bitki kökü için istenilen üniform toprak şartlarında, kök yoğunluğu üstten aşağıya doğru azalır. Kök bölgesi 4 eşit bölgeye ayrılırsa, su çekimi üstten itibaren sırasıyla yüzde 40, 30, 20 ve 10 oranlarında olduğu kabul edilir.

2.4 Toprak Nemi Dengesi

Bir bitkinin kök bölgesine giren-çıkan su hareketleri Şekil (2.2)'de görülmektedir. Bu sistemde toprak nemi (suyu) dengesinin genel bir ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 2.2 Toprak Nem Dengesi

$$\theta_F R_z = \theta_m R_z + P_e + IRR - ET_a - DP + CR \qquad (2.5)$$

Burada,

θ_F = Dikkate alınan periyod sonunda zemin nemi,

R_z = Bitkinin kök derinliği (mm),

θ_m= Periyod başlangıcında zemin nemi,

P_e= Etkili yağış yüksekliği (mm),

IRR= Sulama derinliği (mm),

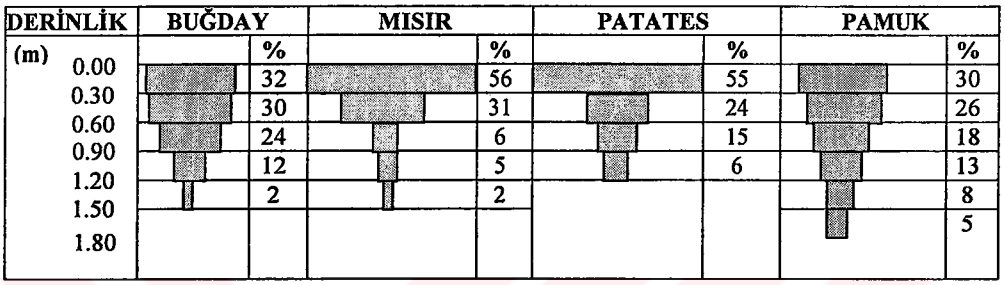
ET_a= Gerçek evapotranspirasyon (mm),

DP= Kök bölgesinin altına (derine) sızma (mm),

CR= Kök bölgesine doğru kapilarite yükselmesidir (mm).

2.5 Bitki Kök Yapısı ve Gelişimi

Bitki köklerinin genel oluşumu ve maksimum derinliği genetik olarak belirlense de, köklerin gelişimi ve dağılımı çevresel şartların etkisiyle belirlenir. Köklerin gelişimini kontrol etmede su hayati bir rol oynar. Bitki topraktan suyu kökler vasıtasıyla alıp evapotranspirasyonu gerçekleştirdiğinden, toprak içindeki köklerin yapısı ve dağılımının iyi bilinmesi gereklidir. Üniform toprak profili için değişik bitki köklerinin derinlik boyunca dağılımları Şekil (2.3)'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Üniform Toprak Profili İçin Bitki Köklerinin Derinlik Boyunca Dağılımları (Neumann, 1982)

Borg ve Grimes 48 bitki çeşidinde köklerin derinlik gelişimini genel olarak iyi çevre şartları altında 135 arazi gözlemlerini analiz etmişler ve kök derinliği için aşağıdaki fonksiyonu vermişlerdir (Chang ve Çorapcıoğlu, 1997).

$$z_m = z_T\{0.5 + 0.5\sin[303(t/t_T) - 1.47]\} \qquad (2.6)$$

Burada,

z_m= Dikkate alınan periyottaki kök derinliği,

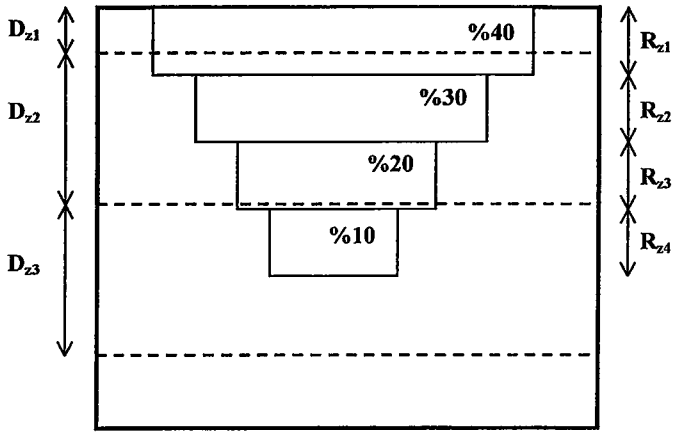
z_T= Maksimum kök derinliği,

t= Ekimden dikkate alınan periyoda kadar geçen zaman,

t_T=Ekimden bitkinin olgunluk derecesine kadar olan zamandır.

Prajamwong ve diğ. (1997)'nin geliştirdikleri modelde bitki evapotranspirasyonunu farklı toprak tabakalarına karşı gelen kök yoğunluğu ve toprak su mevcudiyetinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kök su çekim paternini kök bölgesinin üstünden aşağıya doğru % 40, 30, 20 ve 10 alırlarken, gelişmiş olgun bir bitkinin kök

bölgesindeki toprak su muhtevasının düşey değişiminden dolayı su dengesi hatalarını azaltmak için 3 tabakaya bölmüşlerdir. İlk tabaka en üstte 10 cm kalınlığında alınabilir, diğer iki tabaka iki eşit kalınlıkta alınmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Kök Bölgesinde Su Kullanımı Dağılımı

Her bir bölgedeki kök yoğunluğu faktör oranı:

$$PD_i = \sum_{m=1}^{4}\left(\frac{PD_{max,m}R_{z,i,m}}{100R_{z,m}}\right); \quad \sum_{i=1}^{3}PD_i = 1.0 \tag{2.7}$$

olarak verilmiştir. Burada,

$PD_{max,m}$= Her bir kök bölgesi için kök yoğunluğunun maksimum oranı (40,30,20,10),

$R_{z,i,m}$= Bölge i'deki kök derinliği,

$R_{z,m}$=Kök bölgesi derinliğinin dörtte biridir.

Toprak su çekimi oranı sadece kök bölgesi yoğunluğu dağılımı tarafından değil, aynı zamanda toprak su mevcudiyetinden de etkilenir. Toprak su mevcudiyetini ifade eden su kullanılabilir faktörü aşağı verilmiştir.

$$MAF_i = \frac{SWA_i - WP_i}{\sum_{i=1}^{4}(SWA_i - WP_i)}; \quad \sum_{i=1}^{3}MAF_i = 1.0 \tag{2.8}$$

Burada,

MAF_i=Su kullanılabilirlik faktörü,

SWA_i=Gerçek toprak su miktarı (mm),

WP_i=Solma noktasında toprak su miktarı (mm),

Su-kullanılabilirlik faktörü ve kök yoğunluk faktörü yeni ağırlık faktörüyle her bir toprak tabakası için potansiyel ET azalma dağılımını temsil etmek için birleştirilir.

$$RETF_i = \beta_{sk} MAF_i + (1-\beta_{sk}) PD_i ; \quad \sum_{i=1}^{3} REFT_i = 1.0 \qquad (2.9)$$

Burada,

$RETF_i$=i tabakası için ET dağıtım faktörüdür.

β_{sk}=Su kullanılabilirlik ve kök yoğunluğunun etkileri arasındaki ağırlık faktörüdür ($0<\beta_{sk}<1$).

Sulama programı modellerinde kök dağılımı genellikle % 40-30-20-10 oranlarında alınırken, kök gelişimi lineer olarak alınmıştır (Dudley ve diğ., 1972; Vedula ve Mujumdar, 1992).

Lineer kök gelişimi kabul edilir ve bitki büyüme 3. devresinin sonunda maksimum kök derinliğine ulaştığı ve bu devreden sonra kök derinliğinin sabit kaldığı kabul edilirse:

$$R_z^{t+1} = R_z^t + \frac{J - J_p}{J_c - J_p}(R_{z\,max} - R_{z_i}), J < J_c \qquad (2.10a)$$

$$R_z = R_{z\,max}, J \geq J_c \qquad (2.10b)$$

yazılır. Burada,

R_z^t ve R_z^{t+1} = Bitkinin t ve t+1 periyodundaki kök derinliği (m),

J = Yılın takvim günü,

J_c = Kökün etkili olarak ulaştığı tam gelişmiş olduğu tarih,

J_p = Bitkinin ekim tarihi,

R_{zmax} = Olgun bir bitki için maksimum etkili kök derinliği,

R_{zi} = Ekimdeki başlangıç etkili kök derinliğidir.

Toprak yapısı, kök dağılımı ve gelişimi gibi parametrelerin yanında, atmosferdeki nispi nem oranı, buhar basınçları, hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve radyasyon gibi parametreler de bitki su tüketimini belirlemekte önemli rol oynamaktadırlar. Atmosferdeki bu parametrelerin etkisi 3. bölümde detaylı olarak anlatılan evapotranspirasyon hesabında dikkate alınmaktadır.

3. EVAPOTRANSPİRASYON

3.1.1 Giriş

Evapotranspirasyon hidrolojik çevrimin en temel elemanlarından biridir. Yeryüzüne çarpan yağışların % 70'inin, kurak bölgelerde ise % 90'ının buharlaşma ve evapotranspirasyon olarak atmosfere geri dönmesi evapotranspirasyonun ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Burman ve Pochop, 1994). Evapotranspirasyon, bir alandaki bitkisel gelişimin terleme ve bitki dokularının inşası için kullanıldığı suyun hacmi ile topraktan buharlaşan su hacimleri toplamının herhangi bir zaman için, alana bölünmesiyle elde edilir (Blaney ve Criddle, 1950).

Bitki su ihtiyacı hesaplanırken, bitkinin terlemesi ve dokuları için kullanıldığı su ile topraktan buharlaşma ve bitki yaprakları ile tutulan suyun buharlaşması birbirinden ayrılmamıştır. Bundan dolayı literatürde sık sık "*evapotranspirasyon*" yerine "*bitki su ihtiyacı*" terimi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada evapotranspirasyon ile eş anlamlı kullanılan "bitki su ihtiyacı"nı en iyi şekilde ifade eden tanım FAO-24'de şu şekilde yapılmıştır (Doorenbos ve Pruitt, 1977).

"Bitki su ihtiyacı, geniş sahalarda (tarlalarda) büyüyen hastalıksız bir bitkinin, mevcut yetişme çevresi altında tam üretim potansiyeline ulaşması ve toprak suyu ve verimliliğini ihtiva eden kısıtsız toprak şartları altında, evapotranspirasyondan dolayı su kayıplarını karşılamak için gerekli su derinliği olarak ifade edilir".

Evapotranspirasyonu etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir yağış, toprak özellikleri, rüzgar, bulutluluk, havanın nemi, sıcaklık, güneş ışığı, radyasyon, topoğrafya (enlem, boylam ve kot) ve sulama uygulamasıdır (Blaney ve Criddle, 1950 ve 1962; Doorenbos ve Pruitt, 1977; Jensen ve diğ., 1990).

Bitkinin terlemesiyle güneş ışığı ve ısının etkisi üzerindeki çalışmalar 1691 yılına kadar gitmektedir. Değişik bitki türlerinin terleme ölçümleri, terleme ile serbest su

yüzeyinden buharlaşma, hava sıcaklığı, güneş radyasyonu ve doygun hava basıncı arasında bir korelasyon olduğunu göstermiştir (Blaney ve Criddle, 1950).

ABD'de ilk bitki su kullanımı ile ilgili çalışmalara 1887'de tarımsal deney istasyonlarının kurulmasıyla başlamıştır. 1887 yılının yazında buğday, arpa, yulaf, mısır ve bahçe bitkilerine verilen sulama miktarları ölçülmesi Colarado Eyalet Üniversitesi tarafından gerçekleştirilmiştir. Mills 1890'da Utah'da, Bullum 1893-1898 yılları arasında Wyoming'de benzer çalışmaları yapmışlardır (Jensen ve diğ., 1990).

1900'lü yılların başından itibaren ABD'nin batı eyaletlerinde iklim verilerinin yanında (yağış-sıcaklık gibi) bitki su tüketimlerinin de ölçülmesi, 1950'de Blaney-Criddle ampirik formülünün geliştirilmesine en önemli katkıyı sağlamıştır (Blaney ve Criddle, 1950).

3.2 Evapotranspirasyon Ölçüm Metotları

a) Toprak Suyunu Ölçme Metodu

ET'nin ilk ölçümlerinden çoğu lizimetrenin yokluğunda tarlalarda toprak su dengesi metotları kullanılarak yapılmıştı. İlk zamanlar toprak suyunu ölçmek için gravimetrik numuneler kullanılmıştır. Şimdi ise yaygın olarak neutron metreler kullanılmaktadır. ET'nin belirlenmesi için aşağıdaki denklem yazılabilir (Burman ve Pochop, 1994).

$$ET=Pe\pm\Delta SM+Ge-DP \qquad (3.1)$$

Burada;

ET= Evapotranspirasyon (mm),

Pe= Etkili yağış (mm),

ΔSM= Toprak suyundaki değişimi; Bunun için artış durumunda negatif (-), azalış durumunda pozitif (+) bir sayı girilir (mm),

Ge= Yeraltı suyunun dikkate alınan toprak derinliğine yaptığı katkı miktarındaki su (mm),

DP= Derine süzülerek kaybolan sudur (mm).

ΔS toprak tabaka kalınlığı (mm), θ_1 ve θ_2 sırasıyla ilk ve son numunelerin hacimsel su muhtevaları ise ΔSM şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta SM=\Delta S(\theta_1-\theta_2)$$

b) Toprak Suyu Ölçümleri

Toprak su ölçümleri uzun yıllar gravimetrik prosedürler ile yapılmıştır. Bu metodun avantajı basit ve en az araç-gereç gerektirmesidir. Yoğun ve hassas bir işçilik gerektirmesi ve aynı yerden tekrardan numune alınamaması bu metodun en önemli dezavantajlarıdır.

ET'nin belirlenmesinde ve sulamanın programlanmasında toprak suyunu ölçmek için kullanılan en yaygın metot neutron metreleridir (Burman ve Pochop, 1994; Blume ve diğ., 1988).

c) Hidrolojik Bütçe Metotları

Bir havzada, tarlada veya diğer bir alanda kütle dengesi denklemi (kütlenin korunma prensibi) kullanılarak ET ölçülebilir.

$$ET=I-O+Pe+\Delta SM+Ge-DP \qquad (3.2)$$

Burada bütün terimler hacim biriminde olup, I ve O sırasıyla bir bölgeye giren ve çıkan ölçülmüş yüzey akımlarıdır. Diğer terimler bir önceki kısımda tanımlandığı gibidir.

d) Lizimetre Ölçümleri

Lizimetreler toprak dolu tanklardır. Bu tanklardan doğal şartlar altında büyüyen bitkilerin buharlaşma ve terlemeyle kaybettikleri suyun miktarı ölçülür. Bir lizimetrenin çapı birkaç santimetreden 10 metreye kadar değişebilir. Lizimetrenin derinliği ise inşa malzemesi ve metotlarına bağlı olarak oldukça değişkendir. Bir lizimetredeki su dengesi, ET=P+ΔSM+EKLENEN SU-ÇIKAN SU şeklinde ifade edilebilir (Jensen ve diğ., 1990; Burman ve Pochop, 1994).

Burada "EKLENEN SU" ve "ÇIKAN SU" tanka eklenen ve tanktan çıkan su miktarlarıdır. P ise tankın aldığı toplam yağıştır. Lizimetreler şu şekilde sınıflandırılabilir.

1-Tartılı lizimetreler: Ağırlıktaki değişimi direkt olarak ölçerek ET'yi belirlemek için kullanılırlar.

2-Tartısız lizimetreler: Bunlar toprak su bütçesi prosedürlerini kullanarak ET'yi hesaplar.

3-Drenaj Lizimetreler: Yer üstüne ET'yi aşacak su uygulanır. Ve lizimetrenin altına yerleştirilen bir noktada toplam çıkış suları ölçülerek, ikisi arasındaki fark artı yağış olarak ET hesaplanır.

e) Dolaylı Meteorolojik Metotlar

ET'nin dolaylı ölçümleri, meteorolojik parametreleri ölçtükten sonra kütle dengesi bileşenleri hesaplayarak yapılabilir. Bu metotlara tipik örnekler Bowen oranı ve Eddy-korelasyonu metotlarıdır (Jensen ve diğ., 1990; Burman ve Pochop, 1994).

f) Oda Teknikleri

ET ölçümleri bitkilerin üzerine yerleştirilen değişik tipteki odalarla elde edilebilir. Oda boyunca kontrol edilen ve bilinen hava akımı devamlı kılınır, ve odaya giren ve çıkan hava arasındaki su buharı konsantrasyonundaki fark ölçülerek ET oranı hesaplanır (Burman ve Pochop, 1994).

g) Biyolojik Metotlar

ET'den çok, terlemeyi doğrudan ölçmesini sağlayan değişik metotlar vardır ve sıkça ağaçlarda uygulanır.

h) Pasif Metotlar (Tava Ölçümleri)

Suyun buharlaşması açık bir tavadan ölçülür ve ET tava buharlaşmasına bir dengeleme faktörü uygulanarak bulunur.

3.3 Bitki Su İhtiyacı (Evapotranspirasyon) Hesap Metotları

3.3.1 Blaney-Criddle Metotları

a) SCS Blaney-Criddle Metodu

Blaney ve Criddle (1950) ABD'nin batı eyaletlerinde deneysel çalışmalar sonucunda, sıcaklık, büyüme mevsiminin uzunluğu, günlük gündüz saatlerinin aylık gündüz saatlerinin toplamına oranı ile ET arasında ilişkiyi gösteren bir ampirik formül geliştirmişlerdir. Bu metot sadece sıcaklık verileri mevcut olan alanlar için önerilebilir. Burada aylık potansiyel evapotranspirasyon değeri, aylık ortalama sıcaklık, enlem derecesine bağlı olan güneşli saatler süresi, bitki cinsine bağlı olan bitki su ihtiyacı katsayısı yardımıyla hesaplanır.

Aylık bitki su ihtiyacı;

$$U=25.4kf \tag{3.3}$$

Burada,

U= Aylık bitki su ihtiyacı (mm)

k= Aylık bitki su kullanma katsayısı,

f= Aylık su kullanma kapasitesi faktörü olup aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$f=(1.8t+32)p/100 \tag{3.4}$$

Burada,

t= Aylık ortalama sıcaklık (^{o}C),

p= sulama bölgesinin enlem derecesine göre ve hesap yapılan zaman aralığına göre aylık ortalama gündüz saatlerinin yıllık ortalama gündüz saatlerine oranıdır.

$$k=k_t k_c \tag{3.5}$$

$$k_t=0.031t+0.240 \quad (3.6)$$

Burada,

k_t=iklim faktörü,

k_c=değeri bitki cinsine göre her ay değişen aylık büyüme katsayısı olup deneylerle her bitki için ayrı ayrı tespit edilerek tablolar ve grafikler şeklinde verilebilen bitki büyüme safhası faktörüdür.

b) FAO-24 Blaney-Criddle Metodu

Bu metot yukarıdaki formülde p'yi hesaplarken aylık gündüz saatleri yerine günlük gündüz saatleri alarak ET'yi günlük hesaplar. Ayrıca, (3.3) denkleminde bitki su ihtiyacı üzerinde iklimin etkisi yeterince ifade edilmediği dikkate alınarak, iklim faktörlerine bağlı bir c katsayısı ile çarpılarak düzeltme yapılır. Bu metot sadece hava sıcaklığı verileri mevcut olan alanlar için önerilir (Doorenbos ve Pruitt, 1977).

$$ET_0 = c[p(0.46T+8)] \quad (3.7)$$

Burada,

ET_0= Dikkate alınan ay için referans bitki evapotranspirasyonu (mm/gün),

c = Düzeltme faktörü (minimum nispî nem, güneş ışığı saatleri ve gün boyu rüzgar tahminlerine bağlı),

p = Toplam günlük saatlerin ortalama günlük yüzdesi,

T = Dikkate alınan ay için günlük ortalama sıcaklıktır (^{0}C).

3.3.2 FAO Tava Buharlaşma Metodu

Buharlaşma tavaları belirli bir açık su yüzeyinden radyasyon, rüzgar, sıcaklık ve nemin buharlaşma üzerinde etkisini dikkate alır. Benzer biçimde, bitki de aynı iklim faktörlerinin etkisi altındadır. Fakat birçok faktör su kaybı farkını meydana getirir. Açık bir su yüzeyinde güneş radyasyonu yansıması % 5-8 civarındayken, birçok bitkide % 20-25 arasındadır. Su ve bitki arasındaki bu ve buna benzer farkları temsil

eden bir tava katsayı, tava buharlaşması ile çarpılarak bitki evapotranspirasyon değeri hesaplanabilir (Doorenbos ve Pruitt, 1977).

$$ET_0=K_pE_{pan} \quad (3.8)$$

Burada,

ET_0= Dikkate alınan ay için referans bitki evapotranspirasyonu (mm/gün),

K_p= Tava katsayısı (tablolardan alınabilir),

E_{pan}= Tava buharlaşmasıdır (mm/gün).

3.3.3 FAO Radyasyon Metodu

Radyasyon Metodu esas olarak Mankkink formülünün adaptasyonudur (Doorenbos ve Pruitt, 1977). Bu metodun hava sıcaklığı, güneşlenme saatleri, bulutluluk ve radyasyon verileri mevcut yerler için kullanılması önerilir. Ortalama nem ve gündüz zamanı rüzgarının genel seviyesini dikkate alarak radyasyon ile bitki su ihtiyacı arasında bir ilişki olduğu kabul edilir.

$$ET_0=c(W\ R_s) \quad (3.9)$$

Burada,

ET_0= Referans bitki evapotranspirasyonu (mm/gün),

c = Ortalama nem ve gün-zaman rüzgar şartlarına bağlı düzeltme faktörü,

W = Sıcaklık ve kota bağlı dengeleme faktörü,

R_s =Eşdeğer buharlaşmada güneş radyasyonu (mm/gün),

R_s (güneş radyasyonu) aşağıda verilen eşitlik ile hesap edilebilir.

$$R_s=(0.25+0.50\ n/N)R_a \quad (3.10)$$

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Burada, n/N gerçek ölçülen güneşli saatlerin maksimum olması muhtemel güneşli saatlere oranı ve R_a atmosferin dış yüzeyinde alınan radyasyon miktarı (mm/gün).

3.3.4 Jensen-Haise Yonca-Referans Radyasyon Metodu

Jensen ve Haise (Jensen ve diğ., 1990) enerji dengesi yaklaşımıyla, iyi sulanmış yonca için bir referans evapotranspirasyonu hesaplamak için aşağıdaki formülü önermişlerdir.

$$\lambda ET_0 = C_T(T - T_x)R_s \tag{3.11}$$

Burada,

λ= Suyun buharlaşma ısısı (MJ kg^{-1}),

ET_0 =Referans Evapotranspirasyon (mm/gün),

C_T= Sıcaklık katsayısı,

T_x= Sıcaklık aksının tutması,

$$T_x = -2.5 - 1.4(e_2 - e_1) - Kot/550 \tag{3.12}$$

$$C_T = \frac{1}{C_1 + C_2 C_H} \tag{3.13a}$$

$$C_1 = 38 - (2\ Kot/305),\ C_2 = 7.3 \tag{3.13b}$$

$$C_H = \frac{5.0}{(e_2 - e_1)} \tag{3.13c}$$

Burada, e_2 ve e_1 bir alanda, yılın en ılıman ayının ortalama maksimum ve ortalama minimum sıcaklıklarında doygun buhar basınçlarıdır.

3.3.5 Thornthwaite Metodu

Aylık ortalama sıcaklık ve günlük güneşlenme süresini esas alan bir metottur. Nemli bölgelerde sağlıklı sonuçlar verir

$$U = 1.6L\left(\frac{10T}{I}\right)^{a} \tag{3.14a}$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} i \tag{3.14b}$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \tag{3.14c}$$

Burada;

U= Aylık evapotranspirasyon (mm),

L= Güneşlenme faktörü, ortalama gündüz saatlerini esas alan, enleme göre 0.82-1.28 arasında değişen bir faktördür, tablodan alınabilir,

T= Aylık ortalama sıcaklık (^{0}C),

I= Sıcaklık indisi,

a= $0.000000675xI^{3}+0.0000771xI^{2}+0.001792xI+0.49239$

i= Aylık sıcaklık indisidir.

3.3.6 Penman Metotları

a) Genel Penman Metodu

Enerji ile hava dinamiği (hava hareketi) terimlerini bir denklemde birleştirildiği için bu metoda kombinasyon metodu da denir (Jensen ve diğ., 1990; Hatfield ve Allen, 1996). Aşağıdaki denklemde sağ taraftaki ilk terim enerjiyi ve ikinci terim ise hava dinamiği terimlerini ifade eder. Penman denkleminin genel formu:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} 6.43 W_f (e_s - e_a) \qquad (3.15)$$

Burada,

λET_0 = Suyun buharlaşması için gerekli enerji (MJm^{-2}/gün)

λ= Suyun buharlaşma ısısı, sabit bir basınç ve sıcaklık altında suyun birim kütlesini sıvı halden su buharı haline dönüşmesi için gereken ısıdır. ($MJ\ kg^{-1}$),

ET_0 = Referans evapotranspirasyon (mm/gün),

Δ= Doymuş buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimi ($kPaC^{-1}$),

γ= Psikrometrik sabit ($kPaC^{-1}$),

R_n= Net radyasyon ($MJ\ m^{-2}$ /gün),

G= Toprak ısı akımı yoğunluğu ($MJ\ m^{-2}$/gün),

W_f= Rüzgar fonksiyonu,

e_s = Günlük ortalama sıcaklıkta doymuş buhar basıncı (kPa) (yerden z kadar yükseklikteki ölçülen değer),

e_a = Havanın ortalama gerçek buhar basıncıdır (kPa) (yerden z kadar yükseklikteki ölçülen değer).

$$\lambda = 2.50 - (2.361 * 10^{-3})T \qquad (3.16a)$$

$$W_f = a_w + b_w u_z \quad (W_z = 1 + 0.53 u_2) \qquad (3.16b)$$

Burada,

T= Havanın ortalama sıcaklığı (^0C),

a_w ve b_w= Ampirik katsayılardır (çayır için sırasıyla 1 ve 0.53 alınması önerilir (Allen ve diğ., 1989)).

u_2= Rüzgar hızıdır (yerden 2 m kadar yükseklikte).

b) FAO Penman Metodu

Ölçülmüş sıcaklık, nem, rüzgar ve güneş ışığı süre veya radyasyon verileri mevcut ise Penman Metodunun bir adaptasyonu evapotranspirasyon hesabı için kullanılabilir. Değiştirilmiş Penman denklemi burada yenilenmiş bir rüzgar fonksiyonunu ihtiva eder. Çayır referans bitki evapotranspirasyonu şöyle hesaplanabilir (Doorenbos ve Pruitt, 1977).

$$ET_0=c[WR_n+(1-W)f(u)(e_s-e_a)] \quad (3.17a)$$

$$f(u)=0.27(1+u_2/100) \quad (3.17b)$$

Burada Penman genel denkleminden farklı olarak,

c = Gündüz ve gece hava şartlarının etkisini telafi etmek için düzeltme faktörü,

W= Dengeleme faktörü,

R_n = Net radyasyon (eşdeğer buharlaşma) (mm/gün),

f(u) = Rüzgar fonksiyonu,

u_2= Yerden 2 m yükseklikte 24-saat rüzgar hızıdır (km/gün).

c) Penman-Monteith Metodu

Penman denklemine (3.15) bitki direnci ile hava dinamiği (hava hareketinin) direncini ekleyerek denklem aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)+\rho_a C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta+\gamma(1+r_c/r_a)} \quad (3.18)$$

Burada (3.15) denkleminden farklı olarak,

ρ_a=Havanın yoğunluğu (kg/m^3),

C_p= Sabit basınçtaki nemli havanın özgül ısısı ($1.01x10^{-3}$ MJ kg^{-1} $^oC^{-1}$),

r_a= Atmosfer sınır tabakasının içine su buharı yayılmasına karşı hava dinamiği direnci (s m^{-1}),

r_c= Su buhar transferine karşı bitki gölge direncidir (s m^{-1}).

d) FAO Penman-Monteith Metodu

FAO-24 (Doorenbos ve Pruitt, 1977)'den sonra araştırmalardaki ilerlemeler ve bitki su ihtiyacının daha hassas hesaplanabilmesi gereği, referans bitki su ihtiyacını (ET_0) hesaplayan FAO metodolojilerinin güncelleştirilmesi ihtiyacını ortaya koymuştur. FAO-Penman Monteith Metodu 0.12 m üniform yüksekliğinde, 70 sm^{-1} 'lik bir yüzey direnci ve 0.23 albedosu olan aktifce büyüyen ve yeterli sulanan bir yeşil çayır yüzeyinden olacak ET'yi temsil eden hipotetik bir bitki alınarak geliştirilmiştir (Allen ve diğ., 1994a, 1994b ve 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}\,u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\,u_2)} \qquad (3.19)$$

Burada,

ET_0 =Referans evapotranspirasyon (mm/gün),

Δ= Doymuş buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/^{0}C),

R_n= Bitki yüzeyindeki net radyasyon (MJ m^{-2} /gün),

G= Toprak ısı akımı yoğunluğu (MJ m^{-2} /gün),

γ= Psikrometrik sabit (kPa/^{0}C),

T= Yerden 2 m yükseklikteki hava sıcaklığı (^{o}C),

u_2 = Yerden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı (m/s),

e_s = Günlük ortalama sıcaklıkta doymuş buhar basıncı (kPa),

e_a = Havanın ortalama gerçek buhar basıncı (kPa),

$$\Delta = \frac{4098e^o}{(T+237.3)^2} \tag{3.20}$$

Burada, e^o= Doymuş buhar basıncı (kPa) olup aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$e^o = 0.6108\exp\left[\frac{17.27\,T}{T+237.3}\right] \tag{3.21a}$$

$$\gamma = 0.665\times10^{-3}P \tag{3.21b}$$

$$P = 101.3\left(\frac{293-0.0065\,z}{293}\right)^{5.26} \tag{3.22}$$

Burada,

P= Atmosfer basıncı (kPa),

z= Zemin kotudur (m).

$$e_s = \frac{e^o(T_{min})+e^o(T_{max})}{2} \tag{3.23}$$

Burada, T_{min} ve T_{max}= Maksimum ve minimum hava sıcaklığıdır (^{0}C).

$$e_a = e_s\,RH_{mean}/100 \tag{3.24}$$

Burada, RH_{mean}= Havanın ortalama nisbi nem oranıdır.

$$G = 0.14(T_{month,i} - T_{month,i-1}) \tag{3.25}$$

Burada, $T_{month,i}$ ve $T_{month,i+1}$= Mevcut ve bir ay önceki ayların ortalama hava sıcaklıklarıdır. Günlük hesaplarda G yaklaşık sıfır alınabilir.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{3.26}$$

R_{ns}=Net kısa dalga radyasyonu (MJ m^{-2} /gün),

R_{nl} =Net uzun dalga radyasyonudur (MJ m^{-2} /gün).

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s \tag{3.27}$$

α= Albedo, yeşil çayır için 0.23 alınabilir veya aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\alpha = 0.29 + 0.06\sin[(J+96)/57.3] \tag{3.28}$$

Burda, J yılbaşından itibaren takvim günü sayısıdır.

$$R_{nl} = \left[\sigma \frac{\left(T_{maxk}^4 + T_{mink}^4\right)}{2}\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)\left(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right)\right] \tag{3.29}$$

Burada,

σ= Stefan-Boltzmann sabiti, $4.903x10^{-9}$ (MJ m^{-2} d^{-1} K^{-4}),

T_{maxk} ve T_{mink} = Maksimum ve minimum günlük hava sıcaklığı (Kelvin),

R_s= Güneş radyasyonu (MJ m^{-2} /gün),

R_{so}= Açık hava radyasyonudur (MJ m^{-2} /gün).

n/N gerçek ölçülen güneşli saatlerin maksimum olması muhtemel güneşli saatlere oranı olduğuna göre;

$$R_s = \left(0.25 + 0.50\frac{n}{N}\right)R_a \tag{3.30}$$

$$R_{so} = 0.75\, R_a \tag{3.31}$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)] \qquad (3.32)$$

Burada,

R_a= Atmosferin dış yüzeyinde alınan radyasyon miktarı (MJ m^{-2} /gün),

G_{sc}=güneş sabiti = 0.0820 (MJ m^{-2} dak^{-1}),

d_r= Dünya-güneş arası nispi mesafe inversi,

ω_s = Güneş batım saati açısı (rad),

φ = enlem (rad),

δ = güneş batışı (rad),

$$\varphi = \frac{\pi}{180}(\text{enlem})$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \qquad (3.33)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \qquad (3.34)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \qquad (3.35)$$

Burada,

J= Yılbaşından itibaren gün sayısıdır.

3.4 Evapotranspirasyon Metotlarının Mukayesesi

Jensen ve diğ. (1990) 20 farklı ET tahmin metotlarını 30 ile 2774 m arasında değişen kotlarda ve 38°S ile 56°N arasında değişen enlemlerde 11 farklı yerde aylık bazda kapsamlı olarak mukayese etmişlerdir. Araştırma sonucu olarak, hem kurak hem de sulak bölgelerde Penman-Monteith metodu en iyi performans gösteren metot

olmuştur. Ayrıca, hesaplanan ET değerleri lizimetre ölçümleri ile karşılaştırılmış ve tahminlerin standart hatası (SEE) aylık tahminlerin istatistikleri yapılarak bulunmuştur.

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2}{(n-1)} \right]^{0.5} \qquad (3.36)$$

Burada,

SEE= Tahminin standart hatası (mm/gün),

Y_i= i. ayda ortalama aylık lizimetre ET'si (mm/gün),

$\hat{Y}_i$= i. ayda ortalama aylık ET hesabı (mm/gün),

n=Toplam gözlem sayısıdır.

20 metod içerisinde SCS Blaney-Criddle ve Thornthwaite metotları lizimetre ET'sini tahminde en zayıf metotlar olduğunu ortaya konmuştur. Penman-Monteith metodu ise en düşük SEE ve en büyük korelasyon katsayısı (r) vererek bütün durumlarda (bütün aylar ve pik ayların kurak ve sulak bölgelerinde) birinci metot olmuştur. Çeşitli metodlar için kurak, sulak ve bütün bölgelerde ağırlıklı SEE ve r değerleri Tablo (3.1)'de vermişlerdir.

Allen ve diğ (1994a, 1994b) FAO Penman Monteith metoduyla yukarıdaki 11 farklı yer için ET'yi hesaplamışlardır. Hesaplanan ET değerlerini Tablo (3.1)'de en güçlü metod olarak görülen Penman-Monteith (ASCE-Penman-Monteith) Metodu ile karşılaştırmışlardır. Bütün bölgeler için, ASCE-Penman Monteith değerlerini FAO-Penman Monteith değerleri ile karşılaştırdıklarında iki metot arasında tam bir uygunluk olduğunu göstermişlerdir (Şekil 3.1).

Amatya ve diğ. (1995) Penman-Monteith, Makkink, Priestley-Taylor, Turc, Hargreaves-Samani ve Thornthwaite metotlarını ABD'de üç ayrı yer için referans evapotranspirasyonu hesaplamak için kullanmışlardır. Çayır referans bitki alındığında, Penman-Monteith metodu diğer 5 metotla kıyaslamak için standart

metot olarak seçilmiştir. Penman-Monteith metodu yaygın olarak kullanılan diğer metotlara göre, şayet veriler mevcut ve güvenilir ise, üstün olduğu bu çalışmada da ortaya konmuştur.

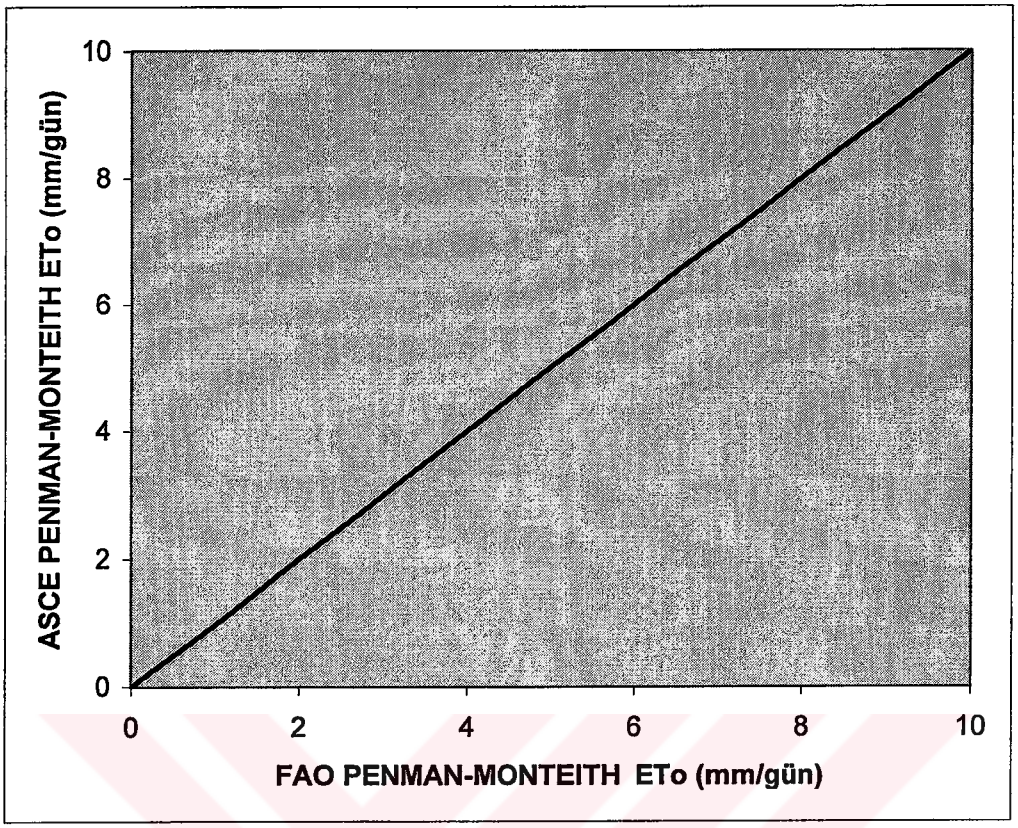
Tablo 3.1 ET Metotlarının Karşılaştırılması (Jensen ve diğ., 1990)

Sıralama	Metot	Kurak Bölge SEE[1]	Sulak Bölge SEE	Bütün Bölgeler	
				SEE	r^2
1	Penman-Monteith	0.49	0.32	0.40	0.99
2	1982 Kimberly-Penman	0.54	0.69	0.59	0.98
3	FAO-PPP-17 Penman	0.68	0.67	0.66	0.97
4	Penman (1963)	0.70	0.60	0.67	0.97
5	Penman (1963), VPD #3	0.67	0.69	0.68	0.97
6	1972 Kimberly-Penman	0.73	0.71	0.72	0.96
7	FAO-24 Radiation	0.62	0.83	0.73	0.97
8	FAO-24 Blaney-Criddle	0.76	0.79	0.76	0.96
9	FAO-24 Penman (c=1)	0.69	0.93	0.82	0.96
10	Jensen-Haise	1.13	0.84	0.95	0.95
11	Hargreaves et al. (1985)	1.17	0.79	1.05	0.93
12	Busginer-van Bavel	1.12	1.03	1.08	0.92
13	FAO-24 Corrected	1.10	1.14	1.10	0.96
14	FAO-24 Pan	1.25	1.09	1.11	0.92
15	SCS Blaney-Criddle	1.29	1.01	1.20	0.87
16	Christiansen pan	1.41	1.12	1.21	0.91
17	Pan evaporation	1.54	1.29	1.35	0.92
18	Turc	1.88	0.56	1.46	0.89
19	Priestley-Taylor	1.89	0.68	1.48	0.90
20	Thornthwaite	2.40	0.86	1.84	0.78

[1]: SEE tahminin standart hatasıdır. [2]: r korelasyon katsayısıdır.

Ölçülmüş datanın eksikliğinde en iyi performans gösteren kombinasyon denklemi olarak Penman-Monteith yaklaşımı tavsiye edilmiştir (Amatya ve diğ., 1995).

Birçok toprak su bütçesi ET'nin günlük bazda tahmin edilmesini gerektirir. Çünkü ET toprak-su dengesinin ana elemanıdır. ET'nin hesaplanmasının yaygın prosedürlerinden birisi ilkönce iyi sulanmış tarımsal bir bitkiden ve standart bir yüzeyden referans ET'yi hesaplamak ve sonra uygun ampirik bitki katsayılarını uygulamaktır (Allen ve diğ., 1989). Bu yüzden ET'yi günlük hesaplayan bir metod seçilmelidir.



Şekil 3.1 ASCE ve FAO Penman-Monteith Metotları Arasındaki İlişki (Allen ve diğ., 1994b)

Steduto ve diğ. (1996) 7 Ortadoğu ülkesinde (İtalya, Tunus, İspanya, Türkiye, Fas, Mısır ve Cezayir) FAO Penman-Monteith metodunu test ettiler. $41^0 31'$ S ile $30^0 31'$ N enlemler ve $34^0 55'$ E ile $6^0 3'$ W boylamlar arasını kaplayan lizimetre ve meteoroloji istasyonlarından elde edilen verilerle FAO Penman-Monteith metodunun hassasiyeti ölçülmüştür. Sonuçlar dünya çapında günlük ET_0 tahminleri için geliştirilen FAO Penman-Monteith denkleminin kullanımının tavsiyesini desteklemiştir. Bununla birlikte, birçok iklim şartlarında bu metodun ET_0'u eksik hesaplamakta olduğunu göstermişlerdir. Fakat, bunun yüksek buharlaşma talebi olan yerlerle uygun davranış göstermesi olumlu değerlendirilmiş, ve denklemin bu sınırların üstesinden gelecek öneriler verilmiştir. Allen ve diğ. (1998) FAO Penman-Monteith metodunu geliştirirken bu önerileri dikkate almışlardır.

Bu çalışmada, sulama programı için gerekli bitki evapotranspirasyonu günlük hesaplayan, en yeni ve en iyi sonuçlar veren FAO Penman-Monteith metodu kullanılmıştır.

3.5 Bitki Evapotranspirasyonu

Referans bitki evapotranspirasyonundan (ET_0) bitki evapotranspirasyonuna (ET_c) geçmek için, ET_0 bitki karakteristiklerini ifade eden bir bitki katsayısı (K_c) ile çarpılır.

$$ET_c=K_c.ET_0 \tag{3.37}$$

Bitki evapotranspirasyonu (ET_c), standart şartlar altında ve standart olmayan şartlar altında olmak üzere iki kısımda değerlendirilebilir (Allen ve diğ., 1998).

Standart şartlar altındaki bitki evapotranspirasyonu (ET_c), verilen iklim şartlarında optimum toprak suyu ve tam ürüne ulaşım şartları altında geniş sahalarda büyüyen, hastalıksız ve iyi gübrelenmiş bitkilerden evapotranspirasyondur ve yukarıdaki (3.37) denklemiyle hesaplanır.

Standart olamayan şartlar altındaki bitki evapotranspirasyonu (ET_a) ise verilen iklim şartları altında toprak nemi, gübreleme, büyüme ve dolayısıyla tam ürüne ulaşımı optimal olmayan şartlarda bitkiden evapotranspirasyondur. Bu durumda bitki evapotranspirasyonu bir ilave K_s katsayısı ile çarpılarak elde edilir.

$$ET_a=K_s.K_c.ET_0 \tag{3.38}$$

Bu çalışmada toprak nemi hariç ET'yi etkileyen tüm parametreler yeterli ve optimum olduğu kabul edilmiştir. K_s katsayısı sadece su eksikliği durumunda su stresini ifade eden bir değerdir. Bundan dolayı bu çalışmada, standart şart olarak yeterli toprak nemi olması durumu alınmıştır. Standart olmayan şartlarda ise yetersiz toprak nemi söz konusudur. Bitkinin potansiyel evapotranspirasyonu için toprak neminin yeterli olup almadığını K_s katsayısı ifade etmektedir. Toprak nemi yeterli olması durumunda $K_s=1$, yetersiz olması durumunda ise $K_s<1$'dir. Bu durumda (3.37) denklemiyle bitkinin *potansiyel evapotranspirasyonunu* ve (3.38) denklemiyle bitkinin *gerçek (aktüel) evapotranspirasyonunu* hesaplayabiliriz.

3.5.1 Yeterli Toprak Nemi Durumunda Bitki Evapotranspirasyonu (Potansiyel Evapotranspirasyon) ve Bitki Katsayıları

Tarla bitkilerinin evapotranspirasyonu deney istasyonlarında ölçülmüş ve seçilen referans bitkiye göre bitki katsayıları (K_c) geliştirilmiştir. (Doorenbos ve Pruitt, 1977; Wright, 1982; Jensen ve diğ., 1990; Allen ve diğ., 1998).

$$K_c=ET_c/ET_0 \tag{3.39}$$

Referans bitki evapotranspirasyonu (ET_0) değişik iklim şartlarının etkisinin büyük bir kısmını ET_0 hesabında ihtiva eder. Bundan dolayı ET_0 iklim taleplerinin bir indeksini temsil ederken, bitki katsayısı (K_c) ağırlıklı olarak özgün bitki karakteristiklerini temsil eder. K_c'nin standart değerlerinin iklimler ve yerleşimler arasında transferine imkan sağlaması, bitki katsayısı yaklaşımının global kabulü ve kullanışlılığının temel sebebidir (Allen ve diğ., 1998).

Bitkiyi referans bitkiden ayıran 4 ana karakteristik vardır. Bunlar, bitki yüksekliği, bitki-toprak yüzeyinin albedosu, bitki gölge direnci ve topraktan buharlaşmadır.

Referans bitki evapotranspirasyon hesabında iklim karakteristikleri büyük ölçüde yansıtılmasına rağmen, iklim bitki katsayılarını az da olsa etkileyen faktörlerden birisidir. Bitki katsayıları, minimum nispi nem oranı (RH_{min}) % 45 ve ortalama rüzgar hızı 2 m/sn olan yarı nemli iklim olarak tanımlanan standart iklim şartlarında geliştirilmişlerdir.

Tarla bitkileri ile referans yüzey arasındaki topraktan buharlaşma ile bitki transpirasyonundaki farklar bitki katsayısı içinde bütünleştirilmiştir (birleştirilmiştir). Tam gelişmiş bitkiler için toprak buharlaşmasının katkısı oldukça küçük olurken, K_c katsayısı esas olarak transpirasyondaki farkları yansıtır.

Bitki küçükken veya toprağın az bir kısmı bitki örtüsüyle kaplıyken, bir yağış ve sulamadan sonra buharlaşmanın etkisi ağırlıklıdır.

Yağış veya sulamadan dolayı birçok zaman toprağın ıslak olduğu yerde, toprak yüzeyinden buharlaşma önem arz eder ve K_c değeri 1'i geçer. Diğer yandan toprak yüzeyi kuru olduğunda buharlaşma sınırlıdır.

Tarla bitkisi ile referans yüzey arasındaki toprak buharlaşmasındaki farklar çift bitki katsayısı kullanarak daha hassas tahmin edilebilir. Bu durumda bitki katsayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$K_c=K_{cb}+K_e \tag{3.40}$$

Burada,

K_{cb}= Temel bitki katsayısı,

K_e= Toprak suyu (nemi) buharlaşma katsayısıdır.

Bitki geliştikçe bitki örtüsü, bitki yüksekliği ve yaprak alanı değişir. Farklı gelişim evrelerinde farklı evapotranspirasyon değerleri olacağından, K_c de farklı farklı olacaktır.

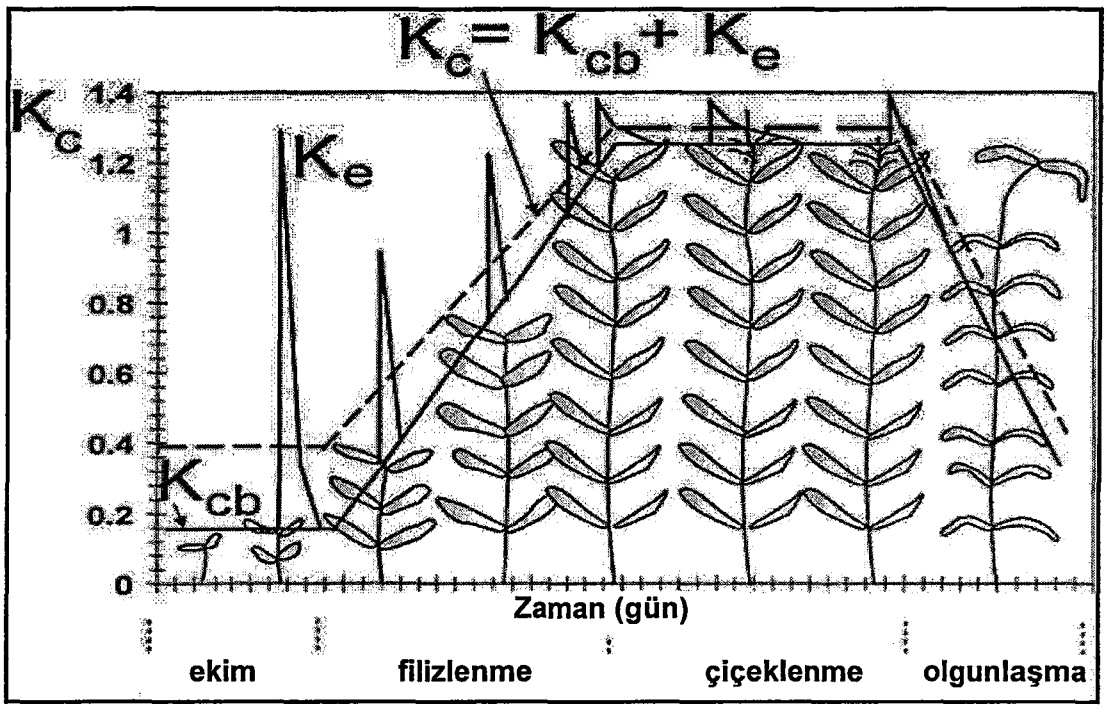
Bitkinin büyüme evreleri 4 kısma bölünebilir. Bunlar ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma devreleridir. K_c'nin değerleri ekim, çiçeklenme ve olgunlaşma devresinde, sırasıyla K_{cini}, K_{cmid} ve K_{cend} olmak üzere, referans bitki yüzeyine göre tablolarda verilmiştir. Her bir evrede tablodan alınan K_c değerleri yerel düzeltmeler yapılarak kullanılabilir (Allen ve diğ., 1988).

Bu çalışmada daha hassas ET hesabı için çift bitki katsayıları ($K_{cb}+K_e$) kullanılmıştır. Bitki katsayısı (K_c) iki ayrı katsayıya birisi bitki transpirasyonu için temel bitki katsayısı (K_{cb}) ve diğeri toprak buharlaşması için (K_e) katsayısına ayrılmıştır. Buna göre bitki evapotranspirasyonu (ET_c) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$ET_c=(K_{cb}+K_e)ET_0 \tag{3.41}$$

K_{cb}'nin değerleri bitki gelişim evreleri için verilse de, K_{cb}'nin yerel düzelmeleri ve K_e'nin hesabı günlük yapıldığından, K_c ve dolayısıyla ET_c günlük olarak hesaplanır.

Bir bitkinin bitki katsayıları büyüme evreleri boyunca değişimi Şekil (3.2)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 K_{cb}, K_e, Ve K_c Bitki Katsayılarının Büyüme Evrelerindeki Değişimleri (Allen ve diğ., 1988)

K_{cb} bitkinin ekim devresinde doğrudan tablodan alınırken, çiçeklenme ve olgunlaşma devresinin sonu için tablodan alınan değerler, yerel düzeltmeler yapılarak kullanılır. Havanın minimum nispi nem oranı (RH_{min}) % 45 ve rüzgar hızı (u_2) 2 m/sn'den farklı ve K_{cbm} ve K_{cbe} değerleri 0.45'den büyük ise aşağıdaki gibi düzeltmeler yapılır.

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h_c}{3}\right)^{0.3} \qquad (3.42)$$

Burada,

$K_{cb(Tab)}$= Çiçeklenme ve olgunlaşma devrelerindeki temel bitki katsayılarının (K_{cbm} ve K_{cbe}) tablodan değerleri,

u_2= 2 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı (m/sn),

RH_{min}= Havanın günlük minimum nispi nem oranı,

h_c= Ortalama bitki yüksekliğidir (m).

Burada filizlenme ve olgunlaşma devresinde bitki katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_{cbi} = K_{cbp} + \left[\frac{i - \sum(L_p)}{L_s}\right](K_{cbn} - K_{cbp}) \quad (3.43)$$

Burada,

K_{cbi}= i. gündeki temel bitki katsayısı,

K_{cbp}= Bir önceki evredeki temel bitki katsayısı,

i= Ekim tarihinden itibaren büyüme sezonu içindeki gün sayısı,

L_p= Önceki evrelerin uzunluğu (gün)

L_s= Hesap yapılan evrenin uzunluğu (gün),

K_{cbn}= Sonraki evrede temel bitki katsayısıdır.

Topraktan buharlaşma katsayısı (K_e)

Toprak yeteri kadar ıslak iken topraktan buharlaşma maksimum oranda olur. Bununla birlikte bitki katsayısı (K_c=K_{cb}+K_e) maksimum bir değeri (K_{cmax}) asla geçmez. Bu değer toprak yüzeyinde buharlaşma için mevcut enerji ile belirlenir. K_e'nin değeri aşağıda köşeli parantez içindeki ifadelerden minimum olanına eşittir.

$$K_e = \min\begin{bmatrix} K_r(K_{cmax} - K_{cb}) \\ (f_{ew}K_{cmax}) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

veya

$$K_e = K_r(K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew}K_{cmax} \quad (3.45)$$

Burada,

K_e= Toprak buharlaşma katsayısı,

K_r= Boyutsuz buharlaşma azaltma katsayısı,

K_{cmax}=Yağış veya sulamayı müteakip K_c'nin alabileceği maksimum değer,

K_{cb}= Temel bitki katsayısı,

f_{ew}= Bitki örtüsüz ve ıslak olan toprağın oranı,

K_{cmax} herhangi bir etkili yüzeyden buharlaşma ve transpirasyonda bir üst limiti temsil eder. K_{cmax} aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$K_{cmax} = \max\left\{\left[1.2+\left(0.04(u_2-2)-0.004(RH_{min}-45)\right)\left(\frac{h_c}{3}\right)^{0.3}\right],\ [K_{cb}+0.05]\right\} \quad (3.46)$$

Buradaki terimler (3.42) denklemindeki terimlerle aynıdır.

Yağış veya sulamadan sonra (toprak neminin tarla kapasitesine ulaşmasından sonra) K_r'nin değeri 1'e eşittir. Toprak yüzeyi veya üst toprak tabakası (yaklaşık 10-15 cm) kurudukça, K_r'nin değeri 1'in altına düşer ve buharlaşma azalır. Üst toprak tabakasında buharlaşma için su kalmadığı zaman K_r'nin değeri 0 (sıfır) olur. Üst toprak tabakasının solma noktasının yarısına kadar kuruyabileceği yani buharlaşabileceği kabul edilir.

Burada topraktan buharlaşma iki aşamada olduğu kabul edilir, bir enerji sınırlama aşaması ve bir de düşme oranı aşamasıdır.

Burada enerji sınırlama aşamasında K_r=1, düşme oranı aşamasında ise K_r aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \qquad D_{e,i-1} > REW \quad (3.47)$$

Burada,

K_r= Topraktan buharlaşmayı azaltma katsayısı,

TEW= Toprak üst tabakasından buharlaşabilecek maksimum su derinliği (mm),

$D_{e,i-1}$= i-1 günü sonunda (bir önceki gün) toprak üst tabakasından toplam buharlaşma derinliği (mm),

REW= Topraktan azaltma olmadan tam buharlaşabilen su derinliğidir (mm).

$$TEW=1000(\theta_{FC}-0.5\theta_{WP})Z_e \quad (3.48)$$

Burada,

θ_{FC}= Tarla kapasitesinde toprak su muhtevası (m^3/m^3),

θ_{WP}= Solma noktasında toprak su muhtevası (m^3/m^3),

Z_e=Buharlaşmayla maruz kalan toprak üst tabakasının derinliğidir (m).

Topraktan buharlaşma büyük ölçüde bitki örtüsüyle kaplı olmayan yüzeylerden olur. Tam toprak yüzeyinin ıslatıldığı yağış veya yağmurlama sulaması gibi durumlarda, buharlaşmanın büyük ölçüde olduğu toprak yüzeylerinin oranı (f_{ew}), ($1-f_c$) olarak belirlenir. Burada f_c bitki tarafından kaplanan (örtülen) toprak yüzeyinin ortalama oranıdır. Bununla birlikte, toprak yüzeylerinin sadece bir kısmının ıslatıldığı (karık sulaması gibi) sulama sistemlerinde f_{ew} sadece sulama ile ıslatılan toprak yüzeyinin oranıyla sınırlıdır. Buna göre f_{ew} aşağıdaki gibi belirlenir.

$$f_{ew}=\min\left\{\begin{matrix}(1-f_c)\\ f_w\end{matrix}\right\} \quad (3.49)$$

Burada,

f_{ew}= Buharlaşmanın olduğu toprak yüzeylerinin oranı,

f_c= Bitki tarafından kaplanan (örtülen) toprak yüzeyinin ortalama oranı,

f_w= Sadece ıslatılan toprak yüzeyinin oranıdır.

f_c bitki katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$f_c=\left(\frac{K_{cb}-K_{cmin}}{K_{cmax}-K_{cmin}}\right)^{(1+0.5h_c)} \quad (3.50)$$

Burada,

K_{cb}= Hesap yapılan gün veya periyot için temel bitki katsayısı,

K_{cmin}= Bitki örtüsü olmadığı durumda kuru çıplak toprak için minimum K_c'nin değeri (yaklaşık 0.15-0.20),

K_{cmax}= Islanmayı müteakip maksimum K_c değeri

h_c= Ortalama bitki yüksekliğidir (m).

Üst toprak tabakasındaki su dengesi aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - P_{e,j} - IRR_i + E_i/f_{ew} + T_i + DP_{e,i} \quad (3.51)$$

Burada,

$D_{e,i}$= i. günde ıslanmayı müteakip topraktan toplam buharlaşma derinliği (mm),

$D_{e,i-1}$= i-1. günde ıslanmayı müteakip topraktan toplam buharlaşma derinliği (mm),

$P_{e,i}$= i. günde yağan etkili yağış yüksekliği (mm),

IRR_i= i. günde toprağa verilen sulamanın derinliği (mm),

E_i= i. günde buharlaşma ($E_i=K_eET_0$) (mm)

f_{ew}= Bitki örtüsüz ve ıslak yüzeyin oranı,

T_i= i. günde bitki örtüsüz ve ıslak yüzeyden transpirasyon (mm),

$DP_{e,i}$= Toprak üst tabakasından derine sızma kaybıdır (mm).

3.5.2 Yetersiz Toprak Nemi Durumunda (Aktüel) Bitki Evapotranspirasyonu ve Bitki Stres Katsayısı

Bitkinin su talebi kök sistemi yoluyla topraktaki suyla karşılanmaktadır. Bitkinin topraktan aldığı suyun gerçek oranı maksimum evapotranspirasyonuna nazaran ya topraktaki mevcut su miktarının yeterliliği yada bitkinin su açığının neden olduğu stres çekmesiyle belirlenir.

Toprak yeterli ıslandığı zaman, toprak suyu yüksek bir potansiyel enerjiye sahiptir, ve bitki kökleriyle kolayca çekilebilir. Kuru topraklarda toprak nemi düşük bir potansiyel enerjiye sahiptir. Kapiler ve çekim kuvvetleri tarafından toprak matriksine sıkıca çevrelenen toprak suyu bitki kökleri tarafından kolayca çekilemezler.

Yoğun bir yağmur veya sulamadan sonra, toprak su muhtevası tarla kapasitesine ulaşıncaya kadar yerçekimi kuvvetleri etkisi altındaki su kök bölgesi altına drene olur. Toprak su muhtevası tarla kapasitesinde olduğu zaman bitki su tüketimi maksimum evapotranspirasyona eşittir.

Toprak suyunun potansiyel enerjisi belirli bir değerin altına düştüğü zaman, bitki "su stresine" maruzdur denir. Toprak su stresi bitkinin potansiyel evapotranspirasyonunu azaltır. Temel bitki katsayısı (K_{cb}) su stresi katsayısı (K_s) ile çarpılarak (3.41) denklemi düzeltilmiş olarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Aşağıdaki ifadede K_s değeri günlük toprak dengesini dikkate alarak hesaplandığından, hesaplanan ET'ye aktüel evapotranspirasyon denilebilir.

$$ET_a=(K_sK_{cb}+K_e)ET_0 \tag{3.52}$$

Burada,

ET_a= Aktüel evapotranspirasyon (mm),

K_s= Bitki stres katsayısıdır.

Bitkiler teorik olarak *tarla kapasitesi* ile *solma noktası* arasındaki *faydalı kapasite* diye tanımlanan suyu kullanabilirler. Bir kök bölgesindeki faydalı kapasite miktarındaki toplam kullanılabilir su derinliği şöyle hesaplanır.

$$TAW=1000(\theta_{FC}-\theta_{WP})R_z \tag{3.53}$$

Burada,

TAW= Kök bölgesinde toplam kullanılabilir toprak suyu (mm),

R_z= Kök derinliğidir (m).

Her ne kadar solma noktasına kadar toprak suyunun tamamı teorik olarak bitkiler için kullanılabilir olsa da, toprak su muhtevası solma noktasına düşmeden çok önce bitki su çekimi azalır. Toprak su muhtevası belirli bir değerin altına düştüğü zaman, bitkinin evapotranspirasyonu potansiyel ET'nin altına düşer. Bitkinin su stresine girmeden çekebileceği su (RAW) şöyle hesaplanabilir.

$$RAW = p_b.TAW \tag{3.54}$$

Burada,

RAW= Kök bölgesinde bitkinin strese girmeden çekebileceği su (mm)

p_b= Faydalı kapasitenin (toplam kullanılabilir toprak suyunun) bitki strese girmeden çekilebilir kısmıdır.

p_b değeri bitki ve toprak cinsine ve bitkinin potansiyel evapotranspirasyonuna bağlı olarak değişir. Değişik bitki cinsi ve 5 mm'lik potansiyel evapotranspirasyon için p_b değerleri tablolarda verilmiştir. Tablodan alınan p_b değerleri ET_c değerlerine göre aşağıdaki denklemle düzeltilebilir (Allen ve diğ., 1998).

$$p_b = p_{(tablo)} + 0.04(5 - ET_c) \tag{3.55}$$

Bitkinin su stresine girdiği andaki toprak su muhtevasını *"stres noktası ($\theta_s(p_b)$)"* diye tanımlarsak, tarla kapasitesi (θ_{FC}) ile stres noktası ($\theta_s(p_b)$) arasındaki toprak su muhtevasına da güvenli faydalı kapasite diyebiliriz. Buna göre stres noktası aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$\theta_s(p_b) = \theta_{FC} - p_b(\theta_{FC} - \theta_{WP}) \tag{3.56}$$

Şekil (3.3)'te görüldüğü gibi toprak su muhtevası, stres noktasına ($\theta_s(p_b)$)kadar su stresi katsayısı (K_s) 1'e eşittir. Başka bir deyişle, toprak su muhtevası $\theta_s(p_b)$'e düşene kadar bitki evapotranspirasyonu, potansiyel bitki evapotranspirasyonuna eşittir. Toprak su muhtevası $\theta_s(p_b)$'in altına düşerse, su stresi katsayısı (K_s) şu şekilde hesaplanabilir.

$$K_s = \frac{\theta_i - \theta_{WP}}{\theta_s(p_b) - \theta_{WP}} \qquad \theta_i < \theta_s(p_b) \qquad (3.57)$$

$$K_s = 1 \qquad \theta_i \geq \theta_s(p_b) \qquad (3.58)$$

Burada,

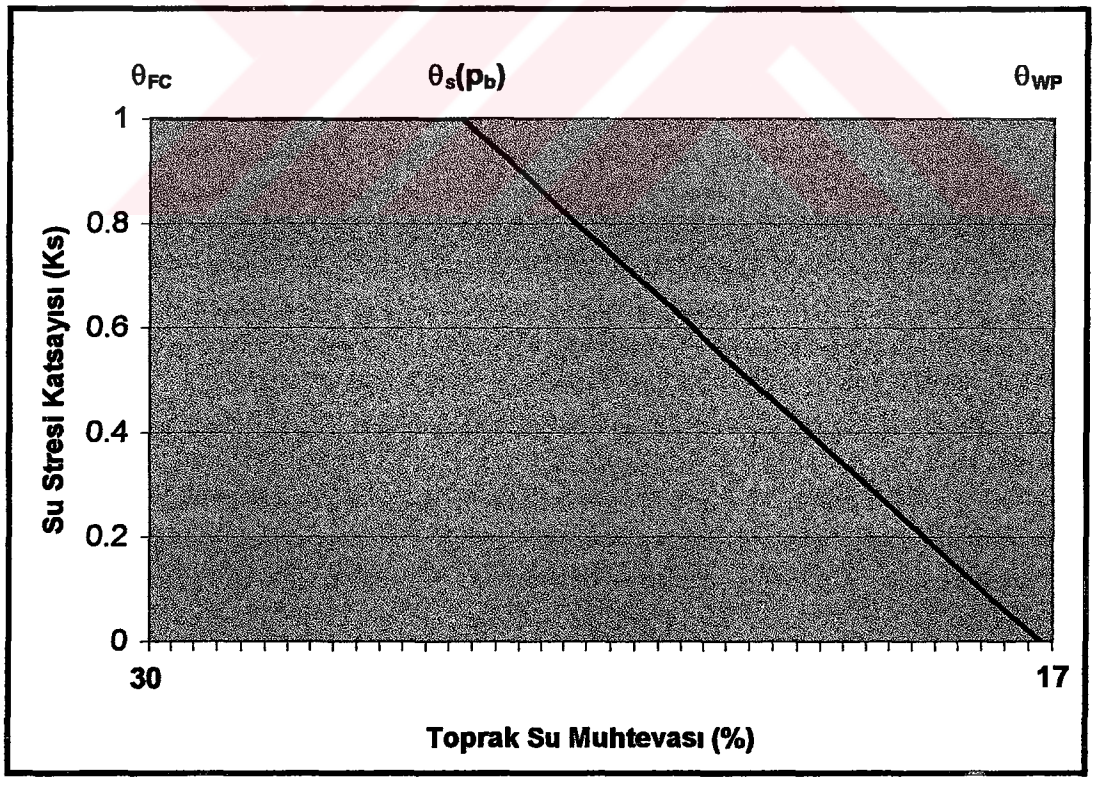
K_s= Bitki su stres katsayısı,

θ_i= i. günde kök bölgesinde toprak suyu muhtevası,

θ_{WP}= Solma noktası,

$\theta_s(p_b)$= Stres noktası olup, p_b'nin değerine göre değişir.

Burada θ_i günlük toprak su dengesi denklemiyle hesaplanabilir. Toprak su dengesi ile ilgili genel konular Bölüm 2'de anlatılmıştır. Bu çalışmada kullanılan toprak su dengesi modeli ise Bölüm 7'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Su Stres Katsayısının Toprak Su Muhtevası ile Değişimi

4. SU-BİTKİ VERİMİ İLİŞKİLERİ

4.1 Giriş

Bitki üretimi için su gereklidir. Yüksek verimler ve verimli bitki üretimi için mevcut suyun en iyi şekilde kullanılması gereklidir. Mevcut suyu en iyi kullanmak ise, farklı büyüme şartları altında bitki gelişimi ve veriminde suyun etkisini doğru anlamaya bağlıdır (Doorenbos ve Kassam, 1979). Sudan başka bitki verimini bitkinin genetik potansiyeli ve çevre koşulları da etkiler. Ancak bu çalışmada su dışında bitkinin ekilen çevreyle uyumlu ve diğer şartların optimum olduğu kabul edilmiştir.

Stewart ve Hagan (1973) bitki verimi ve su arasındaki ilişkileri ve bu ilişkileri etkileyen faktörler hakkında kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada su verimi sınırlayan ana faktör olarak kabul edilmiştir. Su ile verim arasındaki ilişki Şekil (4.1)'de görülmektedir.

Tarla su temini ile verim arasındaki ilişkinin ET ile verim arasındaki ilişkiden faklı olduğu görülmektedir. Burada Y ile ET arasında Y=f(ET) lineer bir ilişki, Y ile IRR (sulama suyu) arasında ise Y=f(IRR) konveks (2. derece polinom) bir ilişki görülmektedir. Stewart ve Hagan (1973) burada ayrıca bir su verimi tarifi yapmışlar ve bu su verimi ile yukarıdaki iki fonksiyon arasında dönüşüm yapılabileceğini ortaya koymuşlardır.

$$E_{irr} = \frac{ET}{IRR} \qquad (4.1)$$

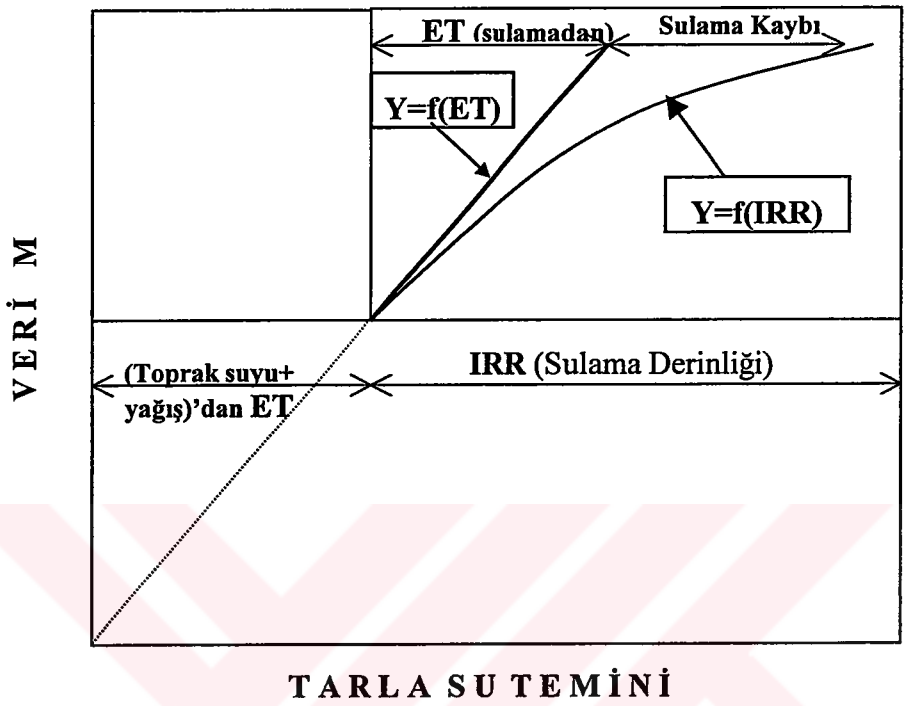
Burada,

E_{irr}= Sulama verimi,

ET= Bitki evapotranspirasyonu (mm),

IRR= Sulama suyu derinliği (mm).

Su kısıtlı ve bitki üretimine çok ihtiyaç olduğunda, amaç net fayda maksimum su-kullanım verimine (birim sulamaya karşılık maksimum üretime) dönüşür (Stewart ve Hagan, 1973; Stewart ve diğ., 1974).



Şekil 4.1 Verim ile Su Temini Arasındaki İlişki (Stewart ve Hagan, 1973)

4.2 Bitki Su Üretim Fonksiyonları

Bitki verimi ile su arasında basit bir ilişki Y=f(W) şeklinde ifade edilebilir (Vaux ve Pruitt, 1983). Bitki verimi ile buharlaşma ve transpirasyon arasında ilişkiyi ifade eden De Wit fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Dariane ve Huges, 1991).

$$Y = m\frac{T_c}{E_0} \qquad (4.2)$$

Burada,

Y= Verim (kg/ha),

m= Bitki suyun mevcudiyeti ve hava şartlarıyla ilgili sabit (kg/ha gün),

T_c= Bitki transpirasyonu (mm),

E_0= Serbest su yüzeyinden buharlaşmadır (mm).

Stewart ve diğ. (Vaux ve Pruitt, 1983) verimle ET arasında aşağıdaki ilişkiyi vermişlerdir.

$$1-\frac{Y_a}{Y_m}=\beta\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (4.3)$$

Burada,

Y_a= Gerçek verim (kg/ha),

Y_m= Maksimum verim (kg/ha),

β= Verim azaltma faktörü,

ET_a= Gerçek evapotranspirasyon (mm),

ET_m= Maksimum evapotranspirasyondur (mm).

Doorenbos ve Kassam (1979) Stewart'ın modelini kullanarak verim ve su arasında ilişkiyi hesaplayan bir metot geliştirmişlerdir. Su stresinin etkisini hesaplayabilmek için ampirik olarak türetilen verim duyarlılık faktörü (K_y) ile verilen rölatif verim azalması ve rölatif evapotranspirasyon açığı arasındaki ilişki türetilmiştir. Farklı bitkiler için K_y'nin değerleri bitki büyüme evrelerindeki farklı birçok araştırma sonuçlarının değerlendirilmesiyle elde edilmiştir.

$$1-\frac{Y_a}{Y_m}=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (4.4)$$

Burada,

K_y= Verim duyarlılık faktörüdür.

Jensen (Vaux ve Pruitt, 1983) büyüme sezonunu evrelere bölen ve her evrede ET verimde birim etkiye sahip bir üretim fonksiyonu geliştirmiştir.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \qquad (4.5)$$

Burada,

λ_i=i. evrede bitkinin su stresine karşı nispi hassasiyetidir.

Hanks Jensen'in üretim fonksiyonuna benzer şekilde bitkinin evapotranspirasyonu yerine transpirasyonunu alarak aşağıdaki eşitliği vermiştir (Vaux ve Pruitt, 1983).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{T_a}{T_m} \right)_i^{\lambda_i} \qquad (4.6)$$

Burada,

T_a= Gerçek transpirasyon,

T_m= Maksimum transpirasyon,

λ_i=i. evrede bitkinin su stresine karşı hassasiyetini ifade eden ağırlık faktörüdür.

Bitki gerçek üretimini hesaplamak için yukarıda verilen ampirik metotlar yerine, her bir bitki için belirli bir bölgede geliştirilmiş üretim fonksiyonlarını kullanmak gereklidir. Ancak, her bir bölgede birçok bitkinin üretim fonksiyonları hakkında yeterli bilgi olmadığından yukarıdaki ampirik metotlar daha yaygın kullanılmaktadır. Doorenbos ve Kassam (1979)'ın geliştirdiği (4.4) ampirik fonksiyon bu çalışmada kullanılmıştır.

4.3 Maksimum Verim (Y_m)

Bir bitkinin maksimum verim seviyesi (Y_m) esas olarak onun genetik özelliklerine ve bitkinin hakim çevreye ne kadar iyi uyum sağladığına bağlıdır. Bir bitkinin maksimum verimi (Y_m) yüksek üretim çeşitliliğinin hasat edilen verimi olarak tanımlanır. Yüksek üretim çeşitliliği, verilen büyüme çevresine iyi-uyum, olgunluğa ulaşmak için uygun zaman, su, besinler ve hastalıkların verimi kısıtlamadığı şartlar altında oluşur.

Maksimum verimi belirleyen en önemli iklim faktörü sıcaklıktır. Bitki, su ve toprak arasında karşılaşılan ilişkiler karmaşıktır ve birçok biyolojik, fizyolojik, fiziksel ve kimyasal işlemler içermektedir. Bitki verimi ve su temini arasındaki ilişki belirlenecek, bitki su ihtiyaçları ve bitki su açıkları maksimum ve gerçek bitki verimi, hesaplandığı zaman, bitkilerdeki su açıkları ve bunun neticesinde bitkide su stresi bitki evapotranspirasyonunda ve bitki veriminde bir etkiye sahiptir. Bitki su stresinin verime etkisi ET_a/ET_m oranıyla ilişkilidir. ET_a'in ET_m'e eşit ve küçük olması durumlarında verimdeki değişim (4.7a) ve (4.7b) eşitliklerinde verilmiştir.

$$ET_a=ET_m \rightarrow Y_a=Y_m \qquad (4.7a)$$

$$ET_a<ET_m \rightarrow Y_a<Y_m \qquad (4.7b)$$

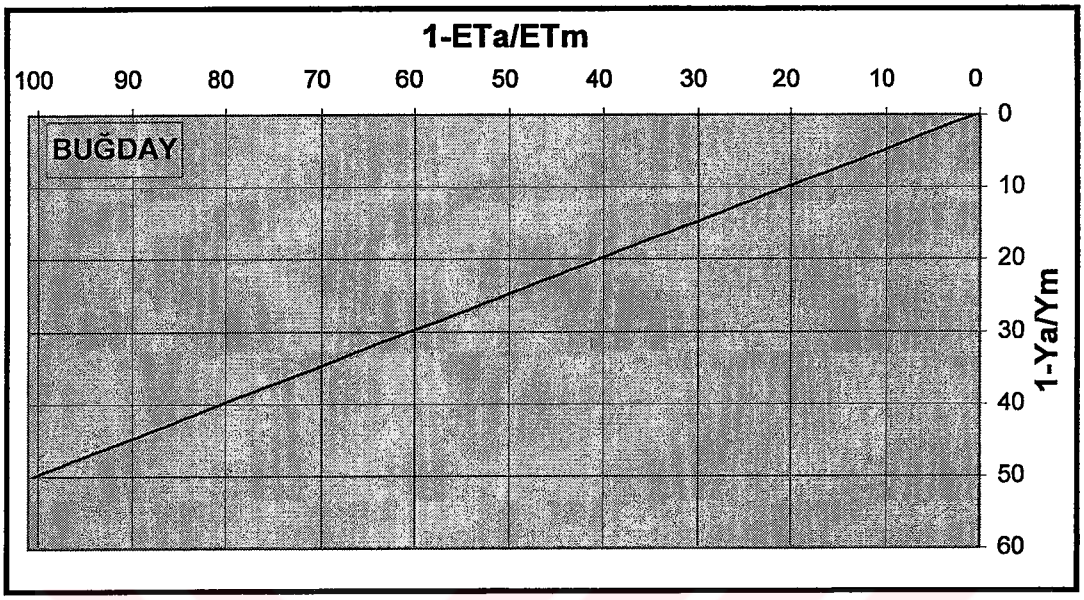
Bitki su ihtiyaçlarının tamamı karşılanması durumunda, bitkideki su açığının bitki gelişiminin ve veriminin etkilendiği bir noktaya kadar yükselir. Su açığının bitki gelişimi ve verimindeki etkisi bitki türü ve bitki büyüme evresi ile değişir. Nispi evapotranspirasyon oranının (ET_a/ET_m) hesaplanması boyunca verim azalmasında bitki su stresinin etkisini değerlendirmek gereklidir. Şayet farklı su temin rejimleri altında maksimum verime (Y_m) ilişkin gerçek bilgi varsa, rölatif verim kayıplarını belirlemek mümkündür. Şayet ekonomik şartlar ve çevre şartları bitkiyi kısıtlamamak kaydıyla, bitkinin tüm su ihtiyaçları karşılanırsa $Y_a=Y_m$, karşılanmıyorsa $Y_a<Y_m$ (Doorenbos ve Kassam, 1979).

4.4 Kısıntılı Sulama

Mevcut su potansiyelinden azami faydayı sağlamak için, bazı kurak dönemlerde bitki su ihtiyacının tamamının verilmesi yerine, eksik su verilerek bir miktar verimden fedakarlık yapılırken daha büyük su miktarı tasarruf edilir. Hazne kapasitesini planlama aşamasında da su miktarında yapılan az bir kısıntıyla proje boyutlarında büyük ekonomi sağlanmaktadır. Bitkilerin büyüme evreleri boyunca suya olan hassasiyetleri farklı farklıdır. Bitkilerin suya daha az hassas oldukları evrelerde su kısıntısı yapıldığında nispi olarak verim azalması daha az olur. Buna bir örnek olarak buğdayın olgunlaşma devresinde su miktarında yapılan 2 birim kısıntıya karşılık verimde 1 birim azalma meydana geldiği Şekil (4.2)'de görülmektedir.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Buğdayın olgunlaşma devresinde suya hassasiyet katsayısı K_y=0.5 olduğundan verim % 10 bir eksilme bitki su ihtiyacında % 20'lik bir kısıntıyla oluşmaktadır.



Şekil 4.2 Buğday İçin Olgunlaşma Devresinde Su-Verim İlişkisi

Sulama programlama yaklaşımlarında bitkilerin su ihtiyaçlarının tamamının karşılanması amaçlanmaz, bunun yerine minimum sulamayla en yüksek bitki ürünü elde edilmesi ve dağıtılan sulama suyunun verimli kullanılmasının artırılması amaçlanır (Kırda ve Kanber, 1999).

Kısıntılı sulama uygulamaları için uzun ve kısa vadede farklı kurumlar birbirinden ayrı kriterler geliştirmiş ve kendi projelerinde uygulamışlardır. Kısıntılı sulama işletme çalışmalarıyla ilgili ilk araştırmalar yapan USBR (United States Bureau of Reclamation), eksik su için aşağıdaki hususları önermektedir.

1-Bir yılda ihtiyacın % 75'in den az olmamalıdır.

2-Ard arda iki kurak yılın en kurağında, ihtiyacın %50'sinden fazla olmamalıdır.

3-Ard arda on yıl içinde toplam eksik su, yıllık ihtiyacın %100'ünü aşmamalıdır.

US Army Corps of Engineers ise proje ömrü boyunca uygulanabilecek kısıntıyı bir indeks ile tarif etmektedir.

Ülkemizde DSİ tarafından farklı projelerde farklı kriterler kullanılmıştır. Bu çalışmanın uygulandığı Çavdarhisar projesi de ülkemizde ilk kısıntılı sulama uygulanan projeler arasındadır (DSİ, 1969; Akkaya ve Tanrıverdi, 1993).

Kısıntılı sulamanın nasıl ve hangi şekillerde yapılacağı da önemlidir. Kodal (1996) kısıntılı sulamada yapılabilecek su tasarrufunun farklı şekillerini aşağıdaki gibi vermiştir.

Yeterli su için elde edilen optimum sulama programında sulama sayısı ve aralıkları sabit tutularak, her bir sulamada gerekenden daha az sulama suyu uygulanması,

Yeterli su için elde edilen optimum sulama programında her bir sulamada verilecek su miktarı sabit tutularak sulama aralıklarının genişletilmesi, sulama sayısının azaltılması,

Yukarıdaki her iki uygulamanın birlikte yapılması,

Yeterli su için elde edilen optimum sulama programındaki bazı sulamalardan vazgeçilmesi,

Verimi (faydası) düşük olan sulama alanlarının sulama programından çıkartılması şekillerinde kısıntılı sulama yapılabilir.

Yukarıdaki çalışmalarda (Akkaya ve Tanrıverdi, 1992; Kodal, 1996) kısıntı oranı olarak sulama suyundaki kısıntı oranı esas alınmış ve yapılan kısıntı bir yıl boyunca veya bitki büyüme devrelerinde sabit alınmıştır. Kısıntılı sulama metodunda suyu en verimli şekilde kullanmak amaç iken, toprak nem suyu dinamik bir yapı göstermesi, yeterli sulamadan sonra belirlenen kısıntı politikasına toprak neminin aynı oranda cevap vermemesi ve iki sulama arasında dinamik verim değişimi göstermesi gibi sebeplerden dolayı yukarıdaki yöntemlerin hiçbirisi suyu verimli şekilde kullanmada hassasiyet temin etmez. Bu çalışmada yukarıdaki kısıntı yöntemlerinden farklı olarak yeni bir dinamik yöntem geliştirilmiştir. *Sulama suyu kısıntısı* ile *bitki su ihtiyacı kısıntı* oranları farklı olduğundan, sulama suyunda yapılacak kısıntının *aynı evrede* bitki su ihtiyacında ve bitki veriminde yapacağı kısıntı hesaplanmıştır. Sulama suyu ile bitki su ihtiyacı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$ET_L = IRR_L + Pe_L + DQM_L \quad (4.8)$$

Burada,

ET_L= L büyüme aşamasında bitki su ihtiyacı (mm),

IRR_L= L büyüme aşamasında sulama suyu (mm),

Pe_L= L büyüme aşamasında bitkinin kullandığı etkili yağış (mm),

DQM_L= L büyüme aşamasında bitkinin kullandığı mevcut toprak suyu (mm),

Burada sulama kısıntı oranı tayin edilmez, aksine mevcut potansiyel suyun optimum dağıtımı yapılırken maksimum net faydayı verecek hangi optimum hem *bitki su ihtiyacı* hem de *sulama suyu kısıntı* miktarları hangi bitkilerin hangi büyüme aşamalarında olacağı belirlenir. Geliştirilen dinamik kısıntılı sulama yöntemi Bölüm 7'de daha ayrıntılı anlatılmıştır.

5. HAZNE İŞLETME ÇALIŞMASI

5.1 Giriş

Hazneler bir akarsu havzasının yıl boyunca değişken su kaynağı potansiyelini düzenler. Hazneler ev ve endüstriyel su temini, sulama, hidroelektrik enerji üretimi, navigasyon ve dinlenme yerleri gibi faydalı maksatlar için kullanılır. Bir haznenin işletme maksadı yukarıdakilerden birisi veya birkaçı olabilir. Belirlenen maksat doğrultusunda haznenin işletme politikası tayin edilir. Bir işletme planı veya politikası değişik şartlar altında hazneden suyun çekilmesi veya bırakılması ve haznede suyun depolanması miktarlarının belirlenmesi için birtakım işletme kurallarıdır. İşletme kuralları gerçek su bırakma kararlarını verecek su yöneticisine yol gösterir. Hazne sistem analizi modeli kullanıcı-belirli işletme kuralını veya kriter fonksiyonlarının çerçevesinde bırakma kuralını vermek için bir mekanizmadır. Hazne işletme kuralları ve kararları aşağıdaki hususlardan bazılarını ihtiva eder (Wurbs, 1996).

Çoklu kullanıcılar ve kullanma tipleri arasında depolama kapasitesini ve nehir akımını dağıtma,

Su sıkıntısının ve taşkının risklerini ve sonuçlarını minimize etmek,

Su, enerji ve toprak kaynaklarını faydalı kullanımla optimize etmek,

Çevresel kaynakları yönetmek,

Depolama kapasitesi, su dağıtımı ve su bırakma politikalarını kapsamlı değerlendirmek için bir çok bilgisayar modelleme ve teknikleri mevcuttur. Hazne sistem analiz modelleri aşağıdaki hususlarda fayda sağlar.

Yeni projelerin inşaat öncesinde hazne depolama kapasitelerinin boyutlandırılması ve işletme politikalarının belirlenmesini,

Mevcut hazne sistemlerinin işletme planının yeniden değerlendirilmesi,

Gelecek yıl veya sezon için yönetim stratejilerinin geliştirmesi için işletme planı,

Gerçek-zaman işletmeleri.

Hazne sistem analiz modelleri aşağıdaki özellikleri temsil etmelidir.

Hazne (nehir) havza sisteminin yerleşimi,

Havza hidrolojisi (nehir akımları),

Hazne karakteristikleri (depolama kapasitesi, hacim-satıh-kot ilişkisi),

Sistem işletme kuralları,

Su kullanım ihtiyaçları (su talebinin zamana göre değişimini),

Sistemin performansının ölçülmesi (amaç fonksiyonu ile faydayı veya verimi maksimize etmek, bazen de riskleri veya kayıpları minimize etmek).

5.2 Analiz Periyodu ve Zaman Aralıkları

Nehir akımları, hazne buharlaşma miktarları ve yağış sisteme giren parametrelerdir. Hazneden su tahliyesi, depolama ve su talepleri her bir zaman adımında hesaplanacak sistemden çıkan parametrelerdir.

Hidrolojik periyodun ve hesap zaman aralığının seçimi anahtar bir noktadır. Bu seçim uygulamanın konusuna, verilerin mevcudiyetine, nehir akımı, su talepleri ve diğer faktörlerin zaman ile değişkenliği özelliklerine bağlıdır.

Bir biriktirme haznesinde gerek akarsuyun getirdiği debide, gerekse su talebinde zaman içinde görülen çalkantıları dengelemeğe çalışılır. Hazneye birim zamanda giren net akım x(t) ve birim zamanda çıkan su y(t) ile gösterilirse, herhangi bir t anında hazneye giren ve çıkan akımlar su hacminde (S) bir değişim meydana getirecektir. Bu değişim haznenin su dengesi denklemi ile ifade edilebilir.

$$x(t)-y(t)=\frac{dS(t)}{dt} \tag{5.1}$$

Δt zaman aralığında hazneye giren X akımı ve çıkan Y akımı göz önüne alınırsa su dengesi denklemi:

$$X-Y=\frac{\Delta S}{\Delta t} \tag{5.2}$$

gibi yazılabilir. Burada,

$\Delta S=\Delta t$ zaman aralığında haznenin su hacmindeki değişmedir.

Bir haznenin akarsuyun getirdiği akımların düzenleme derecesi, düzenleme oranı ile ölçülebilir.

$$\alpha_d=\frac{E(y)}{E(x)} \tag{5.3}$$

Burada,

α_d=Düzenleme oranı,

E(x)= Hazneye giren net akımların ortalaması,

E(y)= Haznenin sağladığı su miktarının ortalamasıdır.

Eğer $\alpha_d=1$ ise tam düzenlemeyi, $\alpha_d<1$ kısmi düzenlemeyi gösterir. Eğer $\alpha_d<1$ ise, bir miktar $(1-\alpha_d)$ su hazneden savaklanır.

5.3 Hazne İşletme Kuralları

Standart işletme kuralı hazne işletmesinde kullanılabilecek basit bir işletme politikasıdır. Bayazıt (1997) standart işletme kuralını aşağıdaki gibi vermiştir.

$$S_t+x_t\le T_t \quad \text{ise} \quad y_t=S_t+x_t \tag{5.4}$$

$$T_t \le S_t + x_t \le T_t + K \quad \text{ise} \quad y_t = T_t \tag{5.5}$$

$$T_t + K \le S_t + x_t \quad \text{ise} \quad y_t = S_t + x_t - K \tag{5.6}$$

Burada,

S_t= Dönemin (t-inci) başında haznede kullanılabilir su miktarı (minimum hacmin üstündeki miktar,

x_t= Dönem boyunca hazneye giren ve o dönemde tümüyle kullanılabileceği kabul edilen su miktarı,

T_t= Dönem boyunca hazneden çekilmesi hedeflenen su miktarı,

y_t= Dönem boyunca hazneden çekilebilen su miktarı,

K= Haznenin kullanılabilir (aktif) kapasitesidir.

Buna göre herhangi bir dönemdeki kullanılabilecek S_t+x_t su miktarı, T_t hedefinden küçükse kullanılabilir suyun tamamı, T_t hedefinden büyük ve hedef+hazne kapasitesinden küçükse sadece talep edilen miktar kadar, talep+hazne kapasitesinden büyükse talep edilen çekildikten sonra hazne kapasitesini aşan kısım savaklanır.

Hazne işletmesi açısından en önemli husus zaman içinde dengelemedir. Haznede biriktirilmiş suyu şimdi kullanmanın mı, ileride kullanılmak üzere saklamanın mı uygun olacağına karar verilmelidir. Bu kararı etkileyen değişkenler haznede mevcut su hacmi, hazneye giren akımlar ve suyun sağlayacağı faydadır. Karar verirken şimdi kullanılan suyun faydası ile suyun gelecekte kullanılması halinde beklenen fayda karşılaştırılır. Bu karşılaştırmayı yaparken savaklanma olasılığı ile şiddetli kuraklık görülmesi olasılığı dikkate alınır (Bayazıt, 1997).

Hazne depolama transformasyonu aşağıdaki süreklilik denklemi ile ifade edilir.

$$S_{t+1}=S_t+Q_t-R_t-E_t \tag{5.7}$$

Burada;

S_{t+1}= t+1. periyotta haznede depolama miktarı,

S_t= t. periyotta haznede depolama miktarı,

Q_t= Birim zamanda hazneye giren akımlar,

R_t= Birim zamanda hazneden su bırakma,

E_t= Birim zamanda hazne yüzeyinden buharlaşmadır.

5.4 Hazne Giriş Akımlarının Stokastik Modellemesi

Bu çalışmada hazne giriş akımları 1. mertebe Markov modeli (AR(1)) olan Thomas-Fiering modeli ile üretilmiştir. AR(1) modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y_{ij} = \rho_{1j} y_{i,j-1} + \varepsilon_{ij} \tag{5.8}$$

Burada, i indisi yılları ve j indisi ayları göstermektedir.

$y_{ij} = \dfrac{x_{ij} - \overline{x}_j}{s_{xj}}$ ile dönüştürülen değişken,

ρ_{1j}=j-1. ve j. inci aylar arasındaki oto korelasyon katsayısı,

ε_{ij}=Bağımsız değişken,

x_{ij}=i. yılın j. ayındaki akım,

$\overline{x}_j$=Aylık ortalama akımlar,

s_{xj}=Aylık akımların standart sapmasıdır.

Bağımsız değişkenin varyansı (σ_{ej}^2):

$$\sigma_{ej}^2 = 1 - \rho_{1j}^2 \tag{5.9}$$

şeklinde hesaplanır.

$$\rho_{1j} = \frac{\rho_{j-1,j} s_j}{s_{j-1}} \tag{5.10}$$

Burada,

$\rho_{j-1,j}$=j-1 ve j-inci aylar arasındaki korelasyon katsayısı,

s_j ve s_{j-1}=j ve j-inci aylar arasındaki akımların standart sapmasıdır.

Model tipi belirlendikten sonra sentetik seriler türetilebilir. İlk önce ε_i bağımsız değişkenine ait değerler türetilir. Bağımsız değişken normal dağılması halinde:

$$z_{1i} = \left(-2\ln \eta_{1i}\right)^{1/2} \mathrm{Cos}\left(2\pi\eta_{2i}\right) \tag{5.11}$$

$$z_{2i} = \left(-2\ln \eta_{1i}\right)^{1/2} \mathrm{Sin}\left(2\pi\eta_{2i}\right) \tag{5.12}$$

Burada,

z_{1i} ve z_{2i} =Standart normal rasgele değişkenlerdir.

η_{1i} ve η_{2i} =0 ile 1 arasında üniform dağılmış rasgele sayılardır.

Burada ε_i bağımsız değişkeni:

$$\varepsilon_i = \mu_e + \sigma_e z_i \tag{5.13}$$

denklemiyle bulunur.

Burada,

μ_e=Türetilmek istenilen bağımsız ε_i değişkeninin ortalaması,

σ_e= Türetilmek istenilen bağımsız ε_i değişkeninin standart sapmasıdır.

1. mertebe Markov modeli için μ_e sıfır olduğundan, yukarıdaki eşitlik:

$$\varepsilon_i = \sigma_e z_i \tag{5.14}$$

halini alır (Bayazıt, 1996 ve 1998; Karabörk ve Kahya, 1999).

Bu çalışmada hazne işletme çalışmasında standart işletme kuralı kullanılmış ve hazne giriş akımları aylık olarak verildiğinden hazne depolama sürekliliği aylık olarak dikkate alınmıştır. Ancak sulama programlaması probleminin özelliğinden dolayı, hazneden çekilebilecek su miktarları sulama sezonu boyunca sulama programıyla günlük belirlenmektedir. 6. bölümde anlatılan Dinamik Programlama Yöntemi kullanılarak ve 7. bölümde geliştirilen **SULAMA** modeli çerçevesinde yapılan optimizasyon ile haznedeki su en verimli şekilde işletilmektedir.

6. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

6.1 Giriş

Optimizasyon birçok fizibıl alternatifler arasından en iyi çözümü bulmaktır. Optimizasyon yöntemleri 3 grupta toplanabilir.

Klasik (Ampirik) Yöntemler,

Benzetim (Simülasyon) Yöntemleri,

Matematik Optimizasyon Yöntemleri.

6.2 Klasik Optimizasyon Yöntemleri

Bu yöntemler için genel bir ifade vermek mümkün değildir. Maksatlara göre elde edilecek üretim değerleri hesaplanarak en iyi çözüm araştırılır. Bu yaklaşımda mühendislik bilgisi ve tecrübesi kullanılarak deneme yanılma teknikleri ile en iyi çözüme ulaşılma hedeflenir. Sonuçta elde edilecek çözümün optimal olduğu garanti edilemez.

6.3 Simülasyon Yöntemleri

En genel anlamda bir sistemin modeli veya temsili simülasyonu olarak adlandırılır. Tüm simülasyon modelleri girdi-çıktı modelleridir. Yani etkileşimli alt sistemlerine bir girdi verildiğinde, bir çıktı verirler. Bu anlamda, simülasyon modelleri, arzulanan bilgiyi ve sonuçları elde etmek için, çözmekten çok koşulurlar. Problemin tam bir matematik formülasyonu yok ise veya matematik modelin çözümlenmesini sağlayacak analitik yöntemler mevcut değilse simülasyondan yararlanmak yerinde olur (Erkut, 1992).

Su kaynakları sistemlerinin en genel halde optimizasyonu için uygun olan yöntem simülasyon yöntemidir. Simülasyon yönteminde sistemin davranışı matematik ve

mantıksal işlemlerden oluşan bir modele benzeştirilerek sistemin durumu izlenebilir. Bu yöntemin en büyük sakıncası optimum çözümü verecek bir algoritmasının bulunmayışıdır. Deneme esaslı olduğundan seçilecek aralıklar bilgisayar zamanını doğrudan etkileyecektir. Hassasiyet arttıkça bilgisayar zamanı artacaktır (Bayazıt, 1994).

Sistem karar değişkenleri ve parametreleri düzenli bir şekilde artırılarak veya azaltılarak en iyi çözüm bulunur. Bu yöntemde de mühendislik tecrübeyle çözüme daha kısa sürede ulaştıracak aralık seçilebilir ve işlem zamanı azaltılabilir.

6.4 Matematik Optimizasyon Yöntemleri

Bir matematik model bir karar verme probleminde faktörler arasındaki ilişkilerin sembolik bir temsilidir (Nemhauser, 1966). Bir matematik modelin temel elemanları:

Değişkenler $D=(d_1,d_2,d_3,...,d_n)$ istenilen amaca ulaşmak için belirli aralıklarda değiştirilen faktörlerdir. Bunlar genellikle karar değişkenleri olarak adlandırılır.

Parametreler $Y=(y_1,y_2,y_3,...,y_p)$ amacı etkileyen fakat kontrol edilemeyen faktörlerdir.

Verimliliğin ölçümü (R), verim veya fayda gibi parametreler ölçü alınır. Verimliliğin ölçümü genellikle amaç fonksiyonu olarak adlandırılır.

Fizibilite bölgesi (S), birçok durumda, karar değişkenleri bazı değerlerle sınırlanır. Sınırlar genellikle bir fizibilite bölgesi veya kısıtlar takımı belirlenerek verilir. Verilen eşitlikler veya eşitsizlikler kısıtlar diye adlandırılan fizibilite bölgesini belirler.

Matematik modellerin en büyük avantajı genel olup bütün problemlere uyması ve istenilen değişikliklerin yapılmasının kolay olmasıdır.

Gerçek olayın matematik modelini kurmak için gerekli analiz ve zihinsel çaba oldukça fazladır. İlk önce sistem değişkenleri etraflıca tanımlanmalı ve verimliliğin bir tek ölçüsü seçilmelidir. Değişkenler arasındaki ilişkiler matematiksel olarak ifade edilmelidir. Bunlardan birisi amaç fonksiyonu diğerleri kısıtlardır. Bir modele çözüm modelin kendisinden daha iyi değildir (Nemhauser, 1966). Bu yüzden model sistemi tam olarak temsil etmelidir. Bunun için hazır kurallar yoktur. Modelin uygun

hassasiyeti çözümün ne kadar hassas istenildiğine ve model değiştirildikçe kararların ne kadar değiştiğine bağlıdır. Modelin sistemi temsil hassasiyeti deneme-yanılma ile bulunur.

Matematik yöntemler deterministik yada stokastik, statik yada dinamik, doğrusal ya da doğrusal olmayan ve sürekli yada kesikli karakterlerde olmalarına göre sınıflandırılabilir (Bayazıt, 1994).

Günümüze kadar matematik optimizasyon modellerinin yaygın kullanılması ve başarısı gelişen bilgisayar teknolojisine bağlıdır. Birçok matematik optimizasyon yöntemlerinden su kaynakları problemlerinde sıkça kullanılan doğrusal ve dinamik programlama teknikleri aşağıda verilmektedir.

6.4.1 Doğrusal Programlama

Doğrusal programlama, amaçları ve kısıtları doğrusal olan problemlerde optimum çözümü bulmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Modelin tüm matematik ifadeleri lineer eşitlik ve eşitsizliklerden oluşur. Amaç fonksiyonu:

$$G = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad x_j \geq 0 \tag{6.1}$$

Amaç fonksiyonunun kısıtları:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i \qquad \begin{matrix} (i = 1,2,.....,m) \\ (j = 1,2,.....,n) \end{matrix} \tag{6.2}$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

G=Amaçlanan fayda veya değer,

x_j=Karar değişkenleri,

a_{ij}, b_i, c_j =Parametrelerdir.

Yukarıdaki problemde amaç fonksiyonunu maksimum yapan x_j değerlerinin bulunması istenmektedir. x_j değerleri simpleks tekniği adıyla bilinen bir algoritma ile

elde edilir. Bu problemin çözümünü bulmak için önce $x_{n+i} \geq 0$, i=1,2, ...,m ek değişikliklerine ekleyerek (6.2) eşitsizlikleri eşitlik haline dönüştürülür.

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j + x_{n+i} = b_i \qquad (i = 1,2,\ldots\ldots,m) \tag{6.3}$$

Bu eşitlik yardımıyla x_j'ler çözülür.

6.4.2 Dinamik Programlama

Dinamik Programlama (DP), büyük sayıda karar değişkeni ve kısıt içeren ve alt problemlere ayrılabilen karar modellerinin çözümünde kullanılan bir tekniktir. DP, Richard Bellman tarafından 1957 yılında geliştirilmiştir. x_i karar değişkeni sayısı n olan bir optimizasyon problemi her birinde bir karar değişkeni bulunan n adet daha basit probleme ayrıştırılır. Tüm sistem parçaları ardışık işlemler görür ve ardışık iki işlem arasında fonksiyonel bir bağıntı kurulur. Amaç fonksiyonu her biri tek bir karar değişkenine bağlı olan toplamının veya çarpımının en büyük veya en küçük yapılması yada en küçüğün maksimizasyonu veya en büyüğün minimizasyonu şeklinde ifade edilmektedir (Nemhauser, 1966; Bertsekas, 1995; Bayazıt, 1997).

$$\max(\min) G = \sum_{i=1}^{n} v_i(x_i) \tag{6.4a}$$

$$\max(\min) G = \prod_{i=1}^{n} v_i(x_i) \tag{6.4b}$$

$$\max G = \min_i [v_i(y_i)] \tag{6.4c}$$

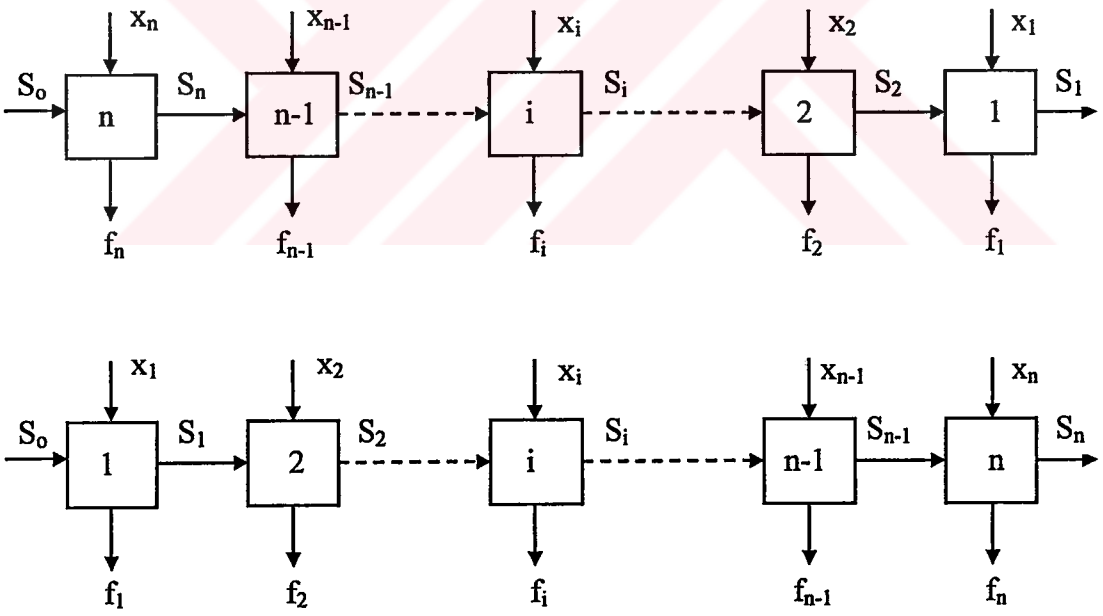
$$\min G = \max_i [v_i(y_i)] \tag{6.4d}$$

Dinamik programlamada amaç fonksiyonu ve kısıtların doğrusal yapıda olması şartı yoktur. Modelin matematik ifadeleri yukarıdaki denklemlerden birine uymak şartı ile herhangi bir yapıda olabilir. Optimalite ilkesine göre çok adımlı bir karar verme probleminde en iyi çözüme varabilmek için herhangi bir adımda verilecek kararların,

bundan önceki adımlarda verilmiş olan kararlar sistemi hangi duruma getirmiş olursa olsun, bulunan duruma göre sistemi optimal bir çözüme götürmesi gerekir.

Çok adımlı karar verme probleminde her bir adımda verilen karar sistemi belli bir duruma getirir. Dinamik programlama yaklaşımı problemi tek değişkenli n adet basit probleme indirgemektir. Dinamik programlamada ele alınan problem bir dizi alt probleme ayrılır. Bütün kademelerde kararlar verildikten sonra, son kademeden itibaren geriye doğru gidilerek kararlar birlikte ele alınıp sonuçlar birleştirilmektedir.

Çözüm tekniği olarak, ilk çözümlemeye problemin son kademesinden başlayıp her seferinde bir önceki kademeyi geçerek geriye doğru (backward) en iyileme tekniği veya problemin ilk kademesi birinci karar problemi olarak ele alınıp her seferinde izleyen kademeye geçerek ileriye doğru (forward) en iyileme tekniği de kullanılabilir. Geriye doğru ve ileriye doğru çözüm teknikleri şematik olarak Şekil (6.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Dinamik Programlamada Geriye Doğru (Backward) ve İleriye Doğru (Forward) Çözüm Teknikleri Şeması

n sayıda bağlantılı kararın söz konusu olduğu bir problemin kademeleri, ilk karar noktası n, izleyen n-1, n-2,.....1 şeklinde gösterilsin, her bir kademeye bağlı olarak sistemin bulunabileceği durumlar d_n ve belirlenen durumlardaki kararlar x_n ile gösterilsin, böylece sistemin amaçları doğrultusunda tanımlanan katkı fonksiyonunun

genel gösterimi $f_n(x_n,d_n)$ şeklinde yazılabilir. Dinamik programlama probleminin geriye doğru çözüm tekniğinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_i(s_i) = \max_{0 \le x_i \le s_i} [g_i(x_i) + f_{i+1}(s_i - x_i)] \tag{6.5}$$

Geriye doğru en iyileme yaklaşımı en genel halde aşağıdaki gibide ifade edilir.

$$\begin{aligned} G(x,s) &= \text{Eniyi}[f_n(x_n,s_n)] + \text{Eniyi}[f_{n-1}(x_{n-1},s_{n-1})] + ... \\ &+ \text{Eniyi}[f_i(x_i,s_i)] + ... + \text{Eniyi}[f_2(x_2,s_2)] + \text{Eniyi}[f_1(x_1,s_1)] \end{aligned} \tag{6.6}$$

Bu çalışmada optimizasyon yöntemi olarak, sulama zamanı ve miktarlarıyla dinamik bir yapı gösteren sulama programlama problemini en iyi şekilde temsil eden dinamik programlama kullanılmıştır.

7. SULAMA MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

7.1 Önceden Yapılmış Çalışmalar

Sulama amaçlı optimal su dağıtımının programlanması modelleri matematik optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesinden sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Matematik optimizasyon yöntemleri içinde özellikle dinamik programlama yöntemi hazne işletme ve sulama programlama modellerinde potansiyel bir araç olarak ispatlanmış ve geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Butcher, 1971; Dudley ve diğ., 1971a, 1971b ve 1972; Dudley, 1972; Dudley ve Burt, 1973; Yakowitz, 1982; Karamouz ve Hovek, 1982; Yeh, 1985; Vedula ve Mujumdar, 1992; Mujumdar ve Ramesh, 1997).

Daha önceki çalışmalarda, sulama için optimum hazne işletmesi için geliştirilen modeller kompleksliğin farklı derecelerinde problemin farklı yönlerine çözümler sunmuştur.

Sulama amaçlı bir haznenin işletilmesinde, hazneye giriş akımları değişken ve stokastik değerler olarak ele alınırken, "sezon bitki su talebi" deterministik olarak dikkate alınmaktadır (Dudley ve diğ., 1971a ve 1971b).

Burt ve Stauber (Vedula ve Mujumdar, 1992) stokastik bitki su talebini dikkate almışlar fakat deterministik su temini kabul etmişlerdir. Dudley ve diğ. (1971a ve 1971b) ve Dudley ve Burt (1973) ise hem stokastik bitki su ihtiyacını hem de stokastik hazne giriş akımını değerlendirmişlerdir.

Dudley ve diğ. (1971a) su kaynağının kısıt olmadığı bir çevrede sadece bir bitki (mısır) için, toprak nemi dinamik değişken ve bitki su ihtiyaçlarını stokastik değişken alarak stokastik dinamik programlama modeli ile optimal sulama suyu dağıtımı yapmışlardır. Dudley ve diğ. (1971b) sınırlı bir su kapasitesi ile stokastik bitki su talebi ve temini alarak bir sezon için bir bitkiden (mısır) ekilecek optimal alanın ve

su temini için kullanılacak haznenin optimal işletilmesi problemini çözmüşlerdir. Dudley ve diğ. (1972) aynı şartlarda bir baraj için optimum sulama alanı büyüklüğünün belirlenmesi problemini incelemişlerdir. Dudley (1972) yine aynı şartlar altında sezonlar arası optimal su dağıtım konusunu incelemiştir.

Yukarıdaki 4 çalışmada bilgisayar zamanı ve maliyeti yüksek olması sebebiyle, mısır bitkisinin sulama suyuna ihtiyacı olduğu sadece 90 günlük periyotta karar aralıları 15 gün olarak alınmıştır.

Vedula ve Mujumdar (1992) muhtelif bitki ekilen bir alanda sulama amaçlı bir haznenin optimal işletme politikası için bir model geliştirmişlerdir. Modelde kök gelişimi lineer, hazne giriş akımları stokastik, yağış ve evapotranspirasyon deterministik ve toprak nemi dinamik olarak alınmıştır. Model ilk aşamada *dinamik programlama* yöntemi kullanarak bir periyot içinde dağıtımın etkisini optimize ederken, ikinci aşamada *stokastik dinamik programlama* kullanarak bir sezon boyunca dağıtımın tüm etkisini belirlemek için sezon içindeki periyotları değerlendirmektedir. Amaç fonksiyonu olarak ise aşağıdaki fonksiyonunu ele alıp, mevcut suyun optimal dağıtımını yapmıştır.

$$\min \sum_{i=1}^{n} K_y \left[1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right] \qquad (7.1)$$

Burada, K_y verim duyarlılık faktörü, ET_a ve ET_m ise aktüel ve potansiyel evapotranspirasyondur. Bu çözüm muhtelif bitkilerin verimlerinin aynı değerde olması ve bütün bitkilerinin birim sulamaya karşılık aynı verimi vermesi durumunda ideal bir çözümdür. Bu durumda, bir bitkinin su açığını minimize ederken, diğer bir bitkinin su açığını minimize etmeyle karşılaştırıldığında minimum su açığı veren çözüm tercih edilecektir. Fakat birim sulamaya karşılık elde edilecek birim verim değeri açısından gerçekte durum böyle değildir. Su açığı daha büyük olan çözüm, birim sulamaya karşılık daha fazla verim verebilir ve onun birim verim değeri daha büyük olabilir.

Mujumdar ve Ramesh (1997) yukarıda yapılan çalışmayı geliştirerek gerçek-zaman hazne işletmesi problemine tatbik etmişlerdir.

Yukarıdaki iki çalışmada karar aralıkları 10 gün alınırken, su (bitkilere verilecek) açığını minimize etmek amaç olarak alınmıştır.

Bu çalışmada, yukarıdaki iki çalışmayla aynı olarak kök gelişimi lineer, hazne giriş akımları stokastik, yağış deterministik ve toprak nemi dinamik olarak alınırken, önceki çalışmalardan farklı olarak bitki katsayıları günlük toprak nemine bağlı olarak dinamik belirlendiğinden, evapotranspirasyon dinamik ve gövde gelişimi de modele katılarak lineer alınmıştır. Ayrıca sulama kısıntı oranları da büyüme evrelerinde dinamik olarak belirlenmiştir. Yukarıdaki tüm çalışmalarda karar aralıkları ve sulama aralıkları birbirine eşit belirli bir gün sayısı (10, 15 gibi) belirlenirken, bu çalışmada karar aralıkları ile sulama aralıları farklı farklı belirlenmiştir. Örneğin karar aralıkları 1 gün seçilirken sulama aralıkları dinamik olarak belirlenmiştir. Bu tip optimizasyon yöntemlerinde hassasiyeti belirleyen en önemli faktör karar aralıklarını mümkün olduğu kadar küçük seçilmesidir. Bu çalışmada seçilen 1 günlük karar aralığı problemin çözümünde gerekli hassasiyeti sağlayacak derecede küçüktür.

Yukarıdaki son iki çalışmadaki amaç fonksiyonunun su açığını minimize etmesi yeterli bir çözüm değildir. Bu çözüm muhtelif bitkilerin verimlerinin aynı değerde olması ve bütün bitkilerinin birim sulamaya karşılık aynı verimi vermesi durumunda ideal bir çözümdür. Bu çalışmada, bitkilerin verim ve birim parasal değerlerini yansıtacak net faydayı maksimize etmek amaç olarak alınmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak ise sulama programlama problemini tam temsil etme karakteristiğinde olan dinamik programlama yöntemi seçilmiştir.

7.2 Sulama Programlaması ve Paket Programları

Sulama programlamasının temel elemanları ET, toprak nem karakteristikleri, kök ve bitki deseni ve sulama teknikleridir. Sulama programlamasında zaman kriteri çok önemlidir. En çok kullanılan programlama modelleri su dengesi veya su bütçesi konseptine dayanır. Literatürde sulama programlamasını hazne işletmesiyle entegre eden çalışmalar azdır. Oysa, sulama programlamasının ET, kök gelişimi, kök su tüketimi gibi elemanları için geliştirilen modeller, sulama programlama modellerinden daha gelişmiştir. Bununla birlikte, sulama programlamasının bu

modelleri daha iyi bir sulama programlama modeli oluşturmak için temel teşkil ederler (Hernandez-Suarez, 1988).

Ayrıca ticari olarak birçok sulama programları mevcuttur. Ancak bunların hiçbirisinde hazne sistemi ile sulama sahasını aynı modelde entegre eden bir yaklaşım yoktur. Bunların çoğu yeterli sulama şartları altında bitki evapotranspirasyonu ve kök bölgesi nemi dengesinden faydalanarak sulama programlaması yaparken, bazıları yetersiz sulama şartlarında da sulama programını hesap etmektedir. Sulama paket programlarında kolaylık ve pratik esas alındığından genellikle optimizasyon yöntemlerine başvurulmamaktadır. Optimizasyon yöntemleriyle çözüm daha çok akademik çalışmalarda yapılmaktadır. En yaygın olarak bilinen sulama programlaması programı CROPWAT (Smith, 1992) FAO tarafından geliştirilmiştir. CROPWAT su kullanım verimi ve bitki verimi dikkate alarak toprak su dengesiyle sulama programını hesaplamaktadır.

Su kaynakları sistemlerinde problemin tam çözümü için, problemi bire bir temsil edecek modelinin ortaya konması gereklidir. Aksi takdirde bir takım hazır programlar ve modellerde çözüm arandığında model tam olarak temsil edilmediğinden hatalı sonuçlar ortaya çıkacaktır. Ayrıca, sunulan program ve modeller kendi sınırları içinde bir çözüm sunacaktır. Bu çalışmada bir sulama programlaması yapılmakla birlikte, dinamik bir yapı gösteren sulama sahası parametreleriyle hem dinamik hem de stokastik bir yapı gösteren hazne depolaması birbiriyle entegre edilerek ve net faydayı maksimize etmeyi amaç alarak, suyun en verimli şekilde kullanılması gibi hazır programlarda bulunmayan çok geniş kapsamlı bir konu incelenmiş ve geliştirilen bir modelle çözülmüştür.

7.3 Bitki Su Tüketim Modeli

7.3.1 Yapılan Kabuller

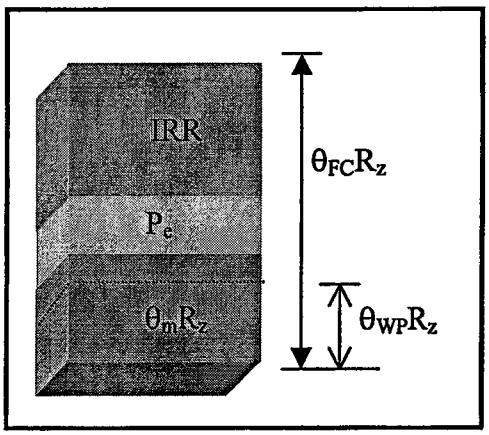
Bu çalışmada bitki su tüketim modeli için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Bitki lineer kök gelişimi ve 3. büyüme devresinin sonunda maksimum kök derinliğine ulaştığı ve bu devreden sonra kök derinliğinin sabit kaldığı kabul edilmiştir.

- Lineer yaprak ve gövde gelişimi kabul edilmiştir.
- Bitki veriminin bitki su tüketimi (ET) ile doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir.
- Yağış verilen bir periyotta tüm bitkiler için aynıdır.
- Sezon başında tüm sahanın toprak neminin tarla kapasitesine eşit olduğu kabul edilmiştir.
- Tüm bitkilerin aynı tip toprakta geliştiği kabul edilmiştir. Tarla kapasitesi (θ_{FC}) ve solma noktası (θ_{WP}) toprak tipinin bir fonksiyonu olup tüm periyotlarda ve tüm bitkiler için aynıdır.

7.3.2 Bitki Sulama Suyu İhtiyacı

Verilen bir periyotta bir bitkinin sulama ihtiyacı, başlangıç toprak nemi ve toprak nemine katkısı olan yağışa bağlıdır. Bu çalışmada yeterli su potansiyeli durumunda sulama politikası, kök bölgesindeki mevcut toprak nemi veya faydalı tarla kapasitesi toprakta güvenli tüketilebilir (bitkiyi su stresine sokmayan) değerin altına düştüğünde sulama yapılması olarak belirlenmiştir. Yetersiz su potansiyeli durumunda ise stres noktasında ($1-KKO_L/2$) oranı kadar bir azaltma yaparak, bitkinin su stresine girmesine kontrollü izin verilir. KKO_L kısıntı kontrol oranı olup, yeterli sulamada sıfıra eşittir. Kök bölgesindeki toprak suyunun elemanları Şekil (7.1)'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen terimler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 7.1 Kök Bölgesinde Toprak Suyu Elemanları

Kök bölgesinde mevcut toprak nemi güvenli tüketilebilir toprak neminin altına düşmesi durumunda, toprağa tarla kapasitesine ulaşacak kadar su verilir. Bu durumlar matematiksel olarak aşağıdaki genel ifadeler gibi yazılabilir (Vedula ve Mujumdar, 1992; Allen ve diğ., 1998).

$$\theta_g^t = (1 - KKO_L/2)[\theta_s(p_b)] \tag{7.2a}$$

$$\theta_m^t > \theta_g^t \rightarrow IRR^t = 0 \tag{7.2b}$$

$$\theta_m^t \leq \theta_g^t \rightarrow \quad IRR^t = (1 - KKO_L/2)\left[\left(\theta_{FC} R_z^t - \left(\theta_m^t R_z^t + P_e^t\right)\right)\right] \tag{7.2c}$$

Burada,

θ_g^t = t periyodunda tüketilmesine izin verilen minimum toprak nem muhtevası,

KKO_L= Kısıntılı sulama durumunda L büyüme aşamasında kısıntı kontrol oranı olup, yeterli sulama durumunda ise sıfıra eşit,

$\theta_s(p_b)$= Bitkinin su stresine girdiği toprak nem muhtevası,

p_b =Kullanılabilir toprak neminin güvenli tüketilebilir kısmı,

θ_m^t =t periyodunda ortalama başlangıç nemi,

IRR^t =Verilen bir t periyodunda bitkinin sulama suyu ihtiyacı,

θ_{FC} =Tarla kapasitesinde toprak nemi,

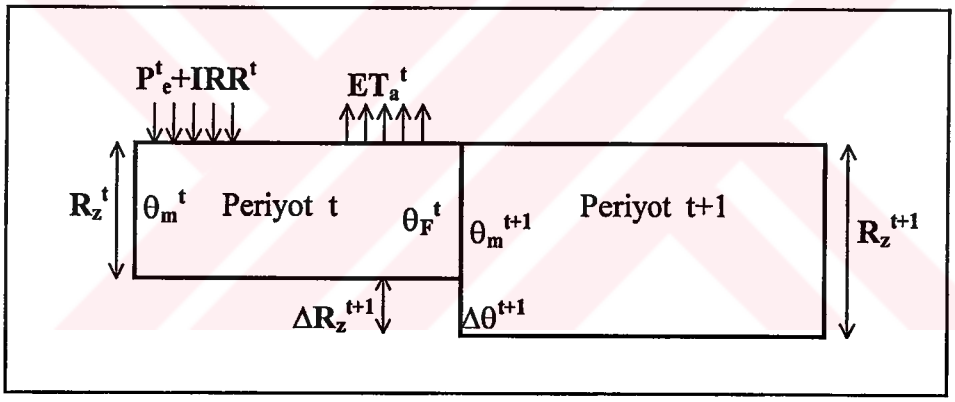
R_z^t =t periyodunda bitkinin kök deriliği,

P_e^t =t periyodunda etkili yağıştır.

Yukarıdaki ifadelerde görüldüğü üzere bitkinin kök bölgesindeki toprak su muhtevasına göre sulama kararı verilmektedir.

7.3.3 Toprak Nemi Dengesi

Bu modelde toprak nemi dengesi günlük olarak dikkate alınarak t ile t+1 periyotları (günleri) arasında toprak nemi dengesi Şekil (7.2)'de gösterilmiştir. t periyodu başlangıcında bilinen toprak nemi (θ^t_m) periyot boyunca gerçekleşen evapotranspirasyon (ET_a), yağış (P_e) ve sulama miktarları yardımıyla t periyodunun sonunda veya t+1 periyodunun başındaki toprak nemi (θ_m^{t+1}) hesaplanabilir. Her bir periyotta hesaplanan toprak nemi (7.2) denklemlerinde kullanılarak sulama suyu miktarının belirlenmesinde önemli rol oynar. Hesaplanan günlük toprak nemi bitki evapotranspirasyonu stres katsayısı (K_s)'nin hesaplanmasında da kullanılarak gerçek evapotranspirasyon miktarı günlük hesaplanır. Toprak nemi, kök bölgesinde suyun sürekli yağış ve sulamayla artan ve ET ile azalan seyrinden dolayı dinamik bir yapıya sahiptir.



Şekil 7.2 Kök Bölgesinde Toprak Nemi Dengesi (Vedula ve Mujumdar, 1992)

Yukarıdaki şekilde görülen toprak nemi dengesi için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\theta_F^t R_z^t = \theta_m^t R_z^t + P_e^t + IRR^t - ET_a^t \qquad (7.3a)$$

$$\theta_m^{t+1} = \min\left(\frac{\theta_F^t R_z^t + \Delta\theta^{t+1}\Delta R_z^{t+1}}{R_z^{t+1}}, \theta_{FC}\right) \qquad (7.3b)$$

Burada,

θ_F^t = t periyodu sonunda zemin nemi,

R_z^t = Bitkinin t periyodundaki kök derinliği (mm),

θ_m^t = t periyodu başlangıcında zemin nemi,

P_e^t =Etkili yağış yüksekliği (mm),

IRR^t =t peryodunda verilen sulama miktarı (mm),

ET_a^t =t periyodunda gerçek evapotranspirasyon (mm),

$\Delta\theta^{t+1} = \Delta R_z^{t+1}$ kök derinliği bölgesindeki zeminin nemi,

ΔR_z^{t+1}=t+1 periyodunda kök derinliğinin t periyodundaki kök derinliğine farkıdır (mm).

$\Delta\theta^{t+1}$ tarla kapasitesine eşit ve sabit bir değer olarak alınabilir. Çünkü t periyodunda bu bölgede kök yoktur. Dolayısıyla bu bölgedeki suyun önceden kullanılmadığı kabul edilebilir.

7.4 Sulama Programı Modeli

7.4.1 Genel Esaslar

Bu çalışmada geliştirilen, hangi bitkiye ne kadar ne zaman su verileceğini dinamik yaklaşımla çözen model kısaca ***SULAMA MODELİ*** olarak adlandırılmıştır.

Bu model bir sezon boyunca sulama sahasında, bitki lineer kök ve yaprak gelişimi ve bitki dinamik su tüketimi modellerini kullanarak ne zaman, nerede, ve ne kadar suya ihtiyaç olduğunu tespit edip, hazneden çekilebilecek suya karşılık elde edilecek verimlerden net faydayı maksimize ederek optimum su dağıtımını sağlamaktır.

Bir bitkinin büyüme sezonu, su stresine karşı bitki hassasiyeti esas alınarak *ekim, filizlenme, çiçeklenme, ve olgunlaşma* olmak üzere dört kritik büyüme devresinde incelenebilir. Bitki su ihtiyacı ve su açığına karşı bitki veriminin hassasiyeti farklı büyüme devrelerinde farklı farklıdır. Örneğin, bir bitkinin filizlenme devresinde verilen bir büyüklükteki su açığı verimde daha büyük azalmaya sebep olabilir. Aynı bitkinin aynı su açığı olgunlaşma devresinde verimde daha küçük azalmaya sebep olabilir. Bu yüzden sadece ne kadar su açığı olduğu değil aynı zamanda belirli bir

bitkinin hangi büyüme devresinde su açığı olduğu da önemlidir. Ayrıca bir bitkinin büyüme devreleri genellikle farklı uzunluktadır (Doorenbos ve Kassam, 1979).

SULAMA modelinde, sezon başında mevcut su kapasitesiyle maksimum verimi verecek optimum bitki deseni belirlemektedir. Daha sonra modelde günlük bitki su ihtiyacı ve toprak nemi belirlenerek suyun optimum şekilde dağıtımı yapılmaktadır.

Su kısıtlı olduğu zamanlarda, suyun dağıtımı bitki verimi ve gelişimi ve suyun en verimli şekilde kullanımını dikkate alınarak yapılmak zorundadır.

Hazneden ne zaman, belirli bir aralıkta ne kadar (miktarda) suyun bırakılacağı kararı aynı zamanda bitkilere ne zaman ve ne kadar su verileceği kararı olmaktadır. Ayrıca, bu su miktarının hangi bitkilere ne kadar verileceğini model tayin eder. Yağış, evapotranspirasyon, toprak nemi ve hazne giriş akımlarındaki belirsizlik karar vermenin karmaşıklığını artırmaktadır.

Sulama için su bırakma politikasını belirlemede, sıkça kullanılan karar aralıkları bitki büyüme sezonu veya bitki büyüme aşamalarıdır. Fakat sulama kararları daha kısa zaman aralıklarında olmalıdır. Gerçek bir durumda 2-10 gün gibi. Bu yüzden, bir ay veya bir sezon gibi geniş zaman aralıkları için karar vermeye yardım eden modeller yetersizdir. Çünkü, bu modeller bu zaman aralıkları içinde sulama talebindeki değişimleri hesaba katamamaktadırlar. Doğru zamanda doğru miktarda suyu bırakabilme kararını verebilmek için sezon içi küçük aralıklarla bütün bitkilerin sulama ihtiyaçlarının hesaplanıp dikkate alınması gereklidir. Aralıkların daha kısa olmasının yanında, bir sezon içi periyotta farklı bitkiler arasında su için mümkün yarışın olması problemin kompleksliğini artırmaktadır. Modelde, herhangi bir periyotta toprak nemi belirli bir seviyenin altına düşerse, orada toprak nemini tam sulamada tarla kapasitesine, kısıntılı sulamada ise kısıntı oranına paralel belirlenen bir seviyeye ulaştıracak kadar o bitkiye su verilir.

Hazne depolama devamlılığı (sürekliliği) ve toprak nem denge gereksinimleri kısıtlar olarak ele alınmıştır. Ekilen alanlar ve bitki takvimleri sabit kabul edilmiştir.

Önerilen model, her bir periyotta her bir bitkiye karşılık tarla seviyesinde sulama dağıtım kararları ile hazne su bırakma kararlarını entegre etmektedir.

7.4.2 Modelin Geliştirilmesi

Bitkinin topraktan suyu bünyesine çekip evapotranspirasyon yolu ile tüketmesi dinamik bir yapı gösterir. Bitkinin kendi karakteristikleri yanında, sıcaklık, rüzgar, nem ve yağış gibi etkenler bitki su ihtiyacını belirlediği gibi, toprak nem kapasitesi de belirleyici etkiye sahiptir. Sulama planlaması ve programlamasında bitki su ihtiyacının kontrol edilmesi çok önemli ve gerekli bir husustur. Bitki su ihtiyacını istediğimiz oranda belirlemek veya kontrol etmek için bitki çevresindeki etkileyici şartlardan sadece kök bölgesindeki toprak nemini kontrol edebiliriz. Özellikle kurak dönemlerde bitki su ihtiyacını ağırlıklı olarak belirleyen tek parametre sulamadır. Bitki kök bölgesine verilecek suyun miktarını ve zamanını karar vererek toprak nemini dolayısıyla su tüketimini ve bundan doğrudan etkilenen bitki verimini kontrol edebiliriz. Bu kontrolün hassasiyeti ise kontrol veya karar aralıklarına bağlıdır. Karar aralıları ne kadar küçük seçilirse hassasiyet o kadar artar.

Başka bir değişle, mevcut kısıtlı su potansiyelini muhtelif bitkiler arasında optimum sulama zamanı ve miktarında dağıtarak maksimum net fayda bulunur.

Bunun için, bitkinin suyu aldığı kök bölgesindeki toprak tabakası kontrol hacmi olarak ele alınır. Bu kontrol hacminde su dengesi istenilen oranda değişimine izin verilerek sulama programlaması yapılır.

Tarlada yapılan sulama programlaması sonucunda karar verilen zamanlarda talep edilen su miktarı bir biriktirme haznesinden karşılanır. Biriktirme haznesi de bir kontrol hacmi olarak ele alınarak giren ve çıkan akımlar bir su bütçesi denklemiyle ifade edilir.

Birisi suyu talep eden bitki kök bölgesindeki toprak tabakası ve diğeri suyu arz eden biriktirme haznesi olmak üzere iki farklı kontrol hacmi birbirine entegre edilerek maksimum fayda bulunur. Biriktirme haznesi ve kök bölgesi arasındaki entegrasyon Şekil (7.3)'de gösterilmiştir.

Biriktirme haznesinde su dengesi aylık olarak hesaplanırken, kök bölgesindeki su dengesi ise günlük hesaplanmıştır. Hazneden sulama sahasına gelinceye kadar iletim ve dağıtım kayıpları ve suyu kök bölgesine verirken oluşan uygulama kayıpları bir α_k

randıman katsayısı ile ifade edilmiştir. α_k randıman katsayısı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

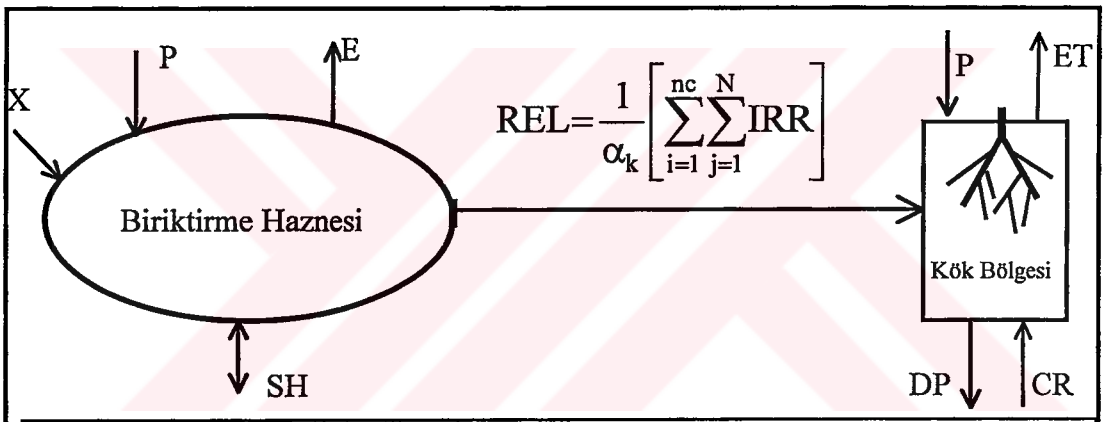
$$\alpha_k = E_i E_d E_u \tag{7.4}$$

Burada,

E_i=İletim kaybı oranı,

E_d=Dağıtım kaybı oranı,

E_u=Uygulama kaybı oranıdır.



X : Hazneye giren akımlar	α_k : Haznedeki suyu tarlada kullanım randımanı
P : Yağış	**IRR:** Her bitkinin günlük sulama suyu ihtiyacı
E : Buharlaşma	**ET** : Evapotranspirasyon
SH : Hazneden veya hazneye sızma	**DP** : Kök bölgesinden derine süzülme
REL : Hazneden bitkilere verilen su	**CR** : Yer altı suyundan kök bölgesine yükselen su
nc : Bitki sayısı	**N** : Gün sayısı (REL günlük ise 1, yıllık ise 365)

Şekil 7.3 Biriktirme Haznesi ile Kök Bölgesi Arasındaki Entegrasyon

Bu çalışmada önce hazneye giriş akımları stokastik olarak sentetik üretilmiştir. Üretilen akımlardan ortalama, sulak ve kurak yıllar belirlenerek her biri için optimum su dağıtım problemi incelenmektedir. FAO Penman-Monteith metodu kullanılarak potansiyel bitki su ihtiyaçları (ET_m) aylık olarak hesaplanır. Bundan faydalanarak USDA SCS (Soil Conservation Service) metoduna göre etkili yağış yükseklikleri bulunur. Su kısıt olmaksızın her bir bitki için günlük bitki su ihtiyaçları, kök bölgesinde günlük toprak nemi dengesi dikkate alınarak FAO Penman-Monteith metoduna göre hesaplanır. Sonraki adımda, biriktirme haznesinde aylık işletme çalışması yapılarak her bir durum (ortalama-sulak-kurak yıllar) için

hazneden yıllık kullanılabilecek toplam depolama miktarı belirlenir. Bu miktarın bir sezon (yıl) içinde tamamı kullanılacağı varsayılarak, o sezon için ekilebilecek en büyük faydayı elde edilecek optimum bitki deseni belirlenir. Optimum bitki deseni belirlenirken, dört durum ayrı ayrı irdelenerek en büyük faydayı sağlayan durum seçilir. Bunlar: 1) Bütün bitkilere tam sulama yapıp gerekirse bir kısım alanı boş bırakma; 2) Daha az su kullanan bitkilerin alanını artırarak bütün alanı sulamaya çalışmak; 3) Kısıntılı sulama yaparak bütün alanı sulamak; 4) Bitkilerin bir kısmında kuru tarım yapıp bir kısmında ise tam sulama yapmaktır. Her bir durumda optimum bitki deseni dinamik programlama tekniğinden faydalanarak belirlendikten sonra, net faydası en büyük olan durum en optimum çözüm olarak seçilir.

Yukarıda seçilen optimum bitki desenine göre, kök bölgesinde günlük toprak nem dengesi dikkate alınarak tüm bitkilerin su ihtiyaçları belirlenir. Biriktirme haznesinden çekilecek toplam su miktarı belirlemek için, bulunan toplam bitki su ihtiyaçları randıman katsayısına bölünerek bulunur. Biriktirme haznesinde aylık işletme çalışması yapılarak bir sezon boyunca taleplerin karşılanıp karşılanmadığına bakılır. Eğer talepler karşılanıyorsa sulama programı (sulamanın hangi bitkiye ne zaman ne kadar verileceği) tayin edilir. Eğer talepler karşılanmıyorsa mevcut yıllık su potansiyeli bitkiler arasında en büyük faydayı verecek optimum dağıtım dinamik programlama tekniği kullanılarak bulunur.

Su potansiyeli yetersiz olduğu durumda kısıntılı sulama belli kriterler çerçevesinde uygulanır. Kısıntılı sulamada 4. Bölümde verilen klasik yöntemlerden farklı olarak yeni bir *dinamik kısıntılı sulama metodu* geliştirilmiştir. *Bunun için maksimum net faydayı verecek hangi optimum kısıntı miktarları hangi bitkilerin hangi büyüme aşamalarında olacağı belirlenir.* Böylece bu duruma göre elde edilen kısıntı oranlarına göre sulama programı bulunur.

Kısıntılı sulamada en temel kriter olarak her bir bitkinin her bir büyüme aşamasında bitki su ihtiyacından en fazla yüzde 30 kısıntıya gidilebileceği kabul edilmiştir. Buna göre, bir bitki için (4.4) denkleminden bu bitkiye ait belirlenen kısıntı sonrasında elde edilecek verim hesaplanabilirse de, kök bölgesindeki toprak nemi ve dolayısıyla bitki su tüketimi dinamik bir yapıya sahip olduğundan, belirlenen veya tayin edilen su kısıntısını pratikte elde etmek mümkün olmamaktadır. Daha açık bir ifadeyle, bir bitkinin büyüme aşamalarının bir kısmında veya tamamında tayin edilen sabit kısıntı

oranı tayin edildiği kadar gerçekleşmemektir. Önceki çalışmalarda (Dudley ve diğ., 1971b; Vedula ve Mujumdar, 1992; Kodal, 1996; Mujumdar ve Ramesh, 1997) tayin edilen kısıntının toprak nemi-bitki su ihtiyacı ilişkisinin sürekliliğine bakılarak gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilmemiştir. Bu çalışmada ise kısıntı oranları tayin edilmemiş bunun yerine bitki büyüme sezonu boyunca toprak nemi ve gerçek su tüketimleri izlenerek değişik kombinezonlar için senaryolar yardımıyla gerçek optimum kısıntı oranları belirlenmiştir.

Toprak nemi-bitki su ihtiyacı-verim ilişkisinin sürekliliği bir sezon boyunca her karar aralığının başlangıcında bir önceki karar aralığının sonuna bağlıdır. Bitki verimi fonksiyonu *sulama suyunun* değil, *bitki su ihtiyacının* bir fonksiyonudur. Bundan dolayı, *sulama suyunda* yapılan kısıntı oranın *bitki su ihtiyacında* meydana getirdiği kısıntı oranı günlük takip edilerek bitki verimi hassas bir şekilde hesaplanmıştır. Bir sulama aralığında veya devresinde *sulama suyunda* yapılan kısıntının aynı devrede *bitki su ihtiyacında* meydana getirdiği kısıntı hassas hesaplanmazsa hem verim hassas hesaplanamaz hem de bitkinin su stresine girme ihtimali olur.

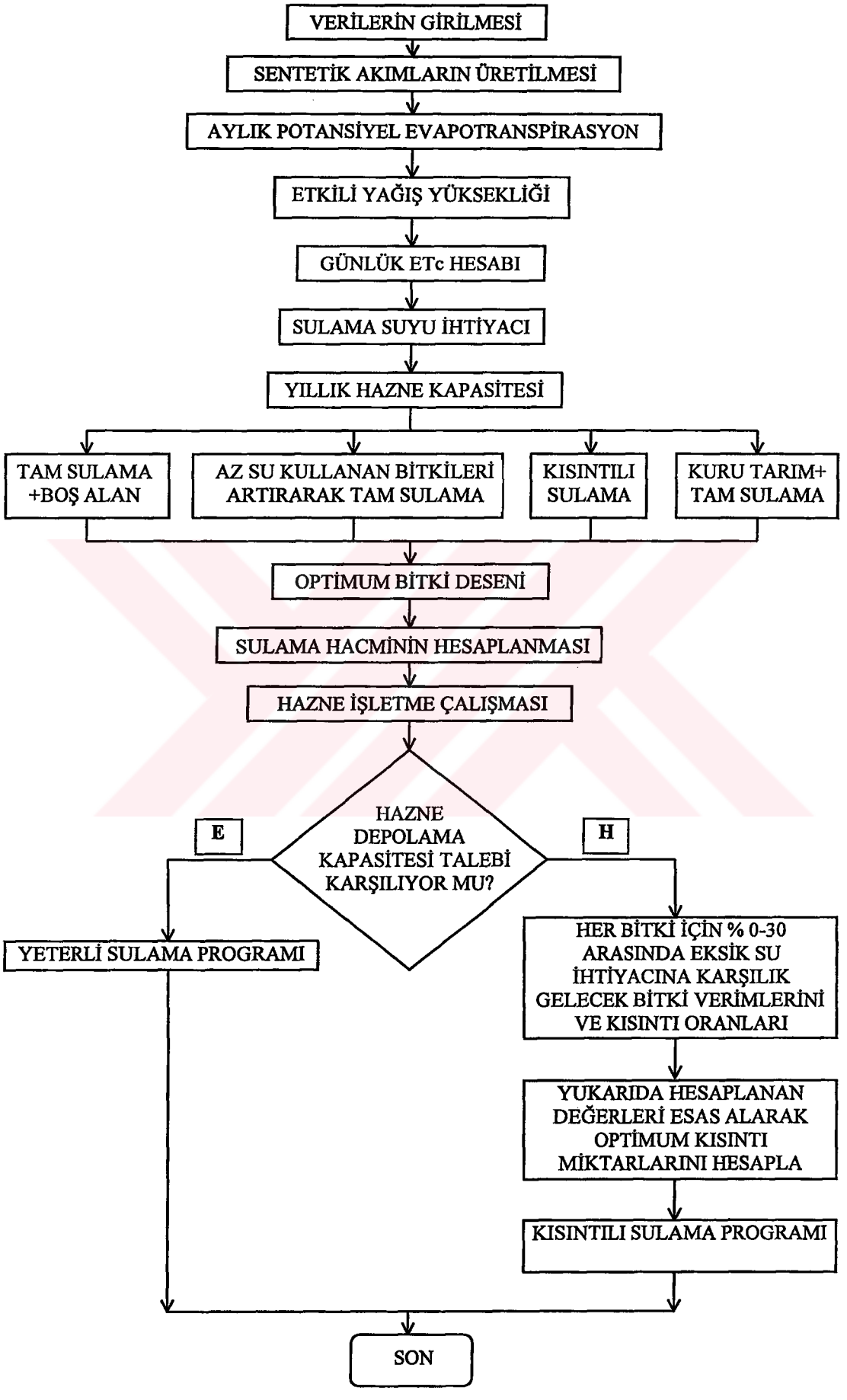
Bu çalışmada yukarıda tanımlanan *dinamik kısıntılı sulama metodu* için, hangi optimum kısıntı miktarları hangi bitkilerin hangi büyüme aşamalarında olacağı ve bu kısıntılara karşılık bitki veriminin ne kadar olacağı geliştirilen bir alt simülasyon programı yardımıyla bulunur. Bitkilerin *verim duyarlılık faktörü* (K_y) sadece bitki büyüme evreleri için mevcut olduğundan, her bir büyüme evresinde olabilecek kısıntı ihtimalleri, bir kısıntı kontrol oranı (KKO_L)'ye % 0-MM arasında değerler verilerek bitki su ihtiyacındaki kısıntı oranı % 30'u aşmayacak şekilde araştırılır. KKO_L'ye ($_L$ bitkinin büyüme evresini temsil etmektedir) bitkinin her bir büyüme aşamasında 0'dan başlayarak birer artan değerler verilerek, bitki büyüme sezonu ekimden-hasada kadar bir senaryo olarak alınıp, toprak nemi, bitki su tüketimi, sulama suyu ihtiyacı ve verim gibi parametreler günlük izlenir.

KKO_L değeri (7.2) denklemlerinde görüldüğü şekilde, bitki su stres noktasının altına $KKO_L/2$ oranı kadar inmesine izin verilirken, toprak nemini tarla kapasitesine ulaştıracak sulamanın da $KKO_L/2$ oranında kısıtlanması kontrolleri kullanılmıştır. Böylelikle tam sulamadakine eşit fakat bitkiyi su stresine sokan yeni bir *kullanılabilir su aralığı* belirlenmiştir. Burada 0 tam sulamayı, MM ise deneme

yanılma ile bulunacak eksiltme oranını ifade etmektedir. Bu çalışmada MM 33 alınmıştır. 0-33 arasındaki bu değerler (KKO_L) bitkinin her bir devresinde farklı değerler alarak olması muhtemel bütün seçenekler birleştirilmiştir. KKO_L değeri için 33'den daha büyük bir değer de kullanılabilir, fakat hem bilgisayar zamanını artırması hem de toprak nem muhtevasını solma noktasının altına düşürmesi dolayısıyla, seçilen KKO_L değeri uygulanan bitki için uygun bir değer olması gereklidir. Aranan kısıntının hangi büyüme aşamasında ne kadar kısıntı oranlarında olduğu, ayrıca aranan değerin birden fazla durumda oluşması halinde verimi en büyük yapan kısıntı oranları seçilmiştir. Bütün bu işlemler sadece bir bitki için 34x34x34x34=1 336 336 adet senaryo izlenerek verimi en yüksek yapan kısıntı değerleri bulunur. Her bir senaryoda, kısıntılı su miktarı için ekimden hasada kadar günlük karar aralıkları ile dinamik sulama suyu ihtiyaçları hesaplanır.

Bitki su ihtiyacında % 30'luk maksimum kısıntı yapıldığında gerekli olan minimum sulama suyu bulunur. Bitkiler için bir sezon boyunca su kaynağından temin edilmesi gerekli maksimum ve minimum su hacmi belirli aralıklara bölünmüştür. Her bir bitkinin birim suya karşılık verdikleri faydaların birbiriyle kıyaslanabilmesi için, bu aralıkların sabit olması gereklidir. Bunun için, biriktirme haznesinin yıllık depolama hacmi (TSTO) 2000'e bölünerek elde edilen aralık kullanılmıştır. Her bir bitkinin minimum ve maksimum arasında belirlenen bu aralıklardaki su potansiyeline karşılık elde edilen kısıntı oranları ve net faydaları yukarıda anlatılan *dinamik kısıntılı sulama metodu* yardımıyla bir alt programda bulunmuştur.

Bulunan bu değerler kullanılarak dinamik programlama yöntemiyle 2000 kısım su potansiyelini bir sezon boyunca n adet bitkiye optimum dağıtma problemi çözülmüştür. Böylelikle, net faydayı en büyük yapan optimum kısıntı oranları (0 ise tam sulama) bulunur. Alt programda bu kısıntı oranlarına karşılık gelen ekimden hasada kadar bütün parametreler (bitki evapotranspirasyonu, toprak nem durumu, dinamik sulama aralıkları ve zamanı gibi) günlük hesaplandığından, haznenin yıllık su kapasitesinin optimum dağıtımı yapılsa da, bitkilere verilecek günlük optimum su dağıtım programı bulunur. Böylelikle bitkilerin sezon boyunca dinamik aralıklarda sulama suyu ihtiyaçları da dolaylı olarak belirlenmiş olur. Bundan daha ilerisi ise, bitkilerin hesaplanan dinamik su ihtiyaçları günlük toplanıp α_k randıman katsayısına bölündüğünde bir sezon boyunca hazneden çekilecek günlük su miktarları bulunmuş olur. Sulama programlaması modelinin genel bir şeması Şekil (7.4)'de verilmiştir.



Şekil 7.4 Sulama Programlaması Modelinin Akış Diyagramı

7.5 Modelin Amaç Fonksiyonu ve Kısıtları

Bu modelde birim alandan birim sulamaya karşılık elde edilecek ürünün değerinin net faydası maksimize edilerek optimal dağıtım yapılmıştır. Ayrıca modelin birinci aşamasında da optimum bitki deseni belirlenirken net faydanın maksimize edilmesi amaç olarak alınmıştır.

Bu çalışmada, G_f sistemin optimum beklenen değeri ve NF sisteminin net faydasını ölçen parametre olsun. NF'nin maksimize edilmesi bu modelin amacıdır.

$$G_f = \max \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{nc} [NF_{i,j}] \tag{7.5}$$

Burada i bitkiyi ve j karar aralığını temsil etmektedir. N toplam karar aralığı sayısını, nc ise toplam ekilen bitki sayısını ifade etmektedir. G_f fonksiyonu daha geniş olarak şöyle yazılabilir.

$$G_f = \max \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{nc} [UNF_{i,j} AREA_i] \tag{7.6}$$

$$UNF_{i,j} = Y_{ai,j}(UB_i - UC_i - UWC_i) \tag{7.7}$$

$UNF_{i,j}$=Birim alandan birim sulamaya karşılık alınan net faydadır (fayda/da/mm),

$AREA_i$=Her bir bitkinin ekim alanıdır (da),

$Y_{ai,j}$=Birim alandan elde edilen gerçek verim,

UB_i=Birim alanda birim verimden elde edilen fayda,

UC_i= Birim alanda birim verimin maliyeti,

UCW_i= Birim alanda birim verime karşılık gelen sulamanın maliyeti,

Doorenbos ve Kassam'ın (1979) önerdiği (4.4) denklemi alınıp ve gerçek verim Y_a denklemin sol tarafında bırakılarak yazılırsa, bitki su-üretim fonksiyonu için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Y_a = \left[1 - K_y\left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)\right] Y_m \quad (7.8)$$

Burada,

Y_a= Gerçek verim (kg/da),

K_y= Verim duyarlılık faktörü

ET_a= Gerçek evapotranspirasyon (mm),

ET_m= Maksimum evapotranspirasyon (mm),

Y_m= Maksimum verimdir (kg/da).

(7.7) ve (7.8) eşitlikleri (7.6)'da yerine konulursa, amaç fonksiyonu en geniş haliyle aşağıdaki gibi olur.

$$G_f = \max \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{nc} \left[1 - K_{yi,j}\left(1 - \frac{ET_{ai,j}}{ET_{mi}}\right)\right] Y_{m_i} (UB_i - UC_i - UWC_i) AREA_i \quad (7.9)$$

Bu fonksiyonun kısıtları:

1. Bütün bitkilerin ekim alanlarının toplamı belirli bir toplam alandan (TAREA) büyük olamaz

$$\sum_{i=1}^{nc} AREA_i \leq TAREA \quad (7.10)$$

2. Bölgedeki kültürel, sosyal ve ekonomik değerleri dikkate alarak, her bir bitki için en düşük ve en yüksek ekilebilecek alanlar önceden tayin edilir.

$$A_{min,i} \leq AREA_i \leq A_{max,i} \quad (7.11)$$

Burada $A_{min,i}$ ve $A_{max,i}$ her bir i bitkisinin ekilebileceği minimum ve maksimum alanlardır.

3. Bitkilere verilen sulama suyu toplamı, haznede yıllık biriken suyun toplamından büyük olamaz.

$$\sum_{i=1}^{nc} X_i \leq TSTO \qquad (7.12)$$

X_i=Her bir bitkiye verilecek su miktarıdır.

TSTO=Haznede yıllık biriken suyun miktarıdır.

4. Bitkinin her bir büyüme aşamasında, bitki su ihtiyacında yapılacak kısıntı miktarı (KO_L) bitkinin o dönem su ihtiyacının % 30'unu geçemez.

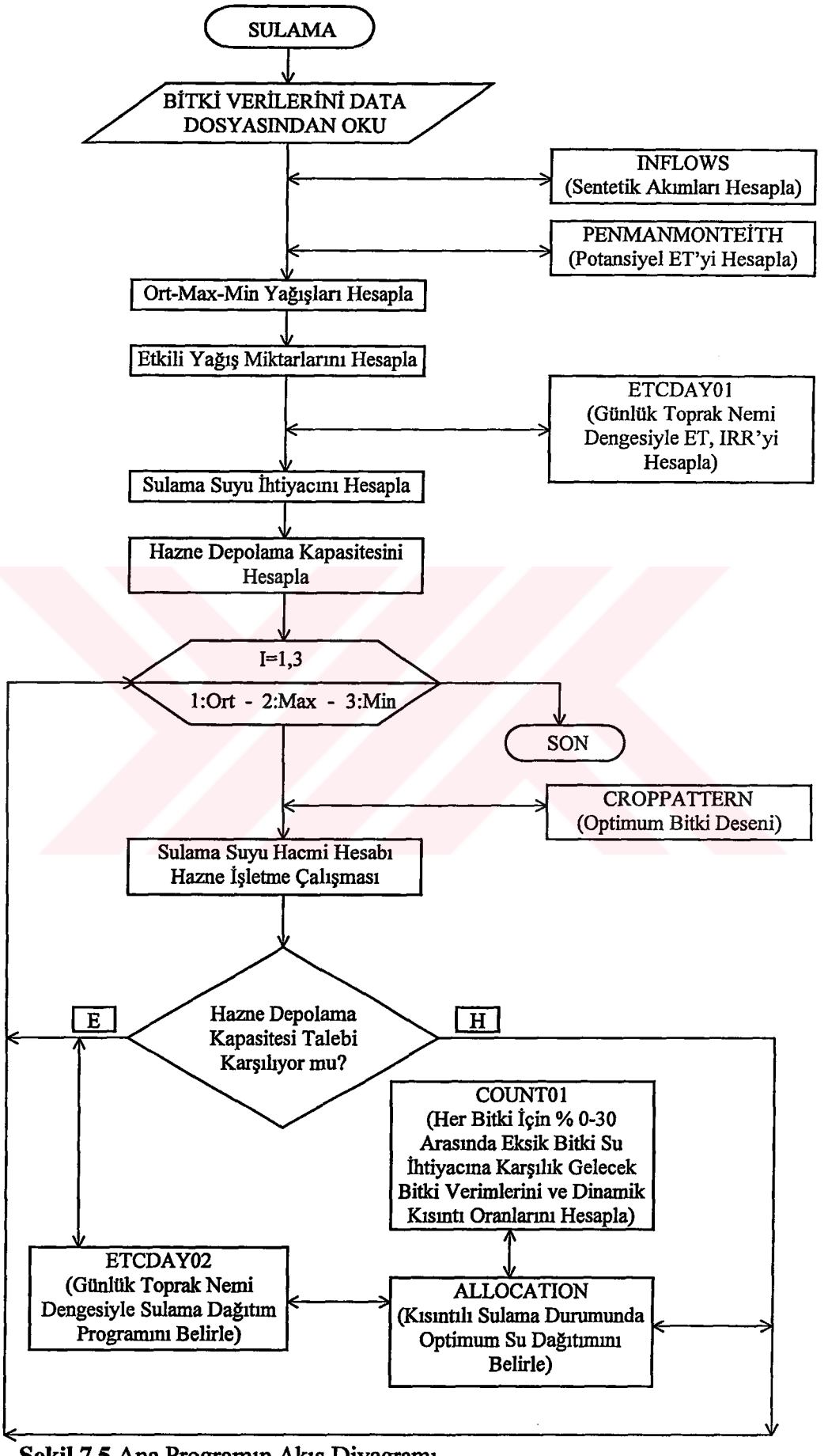
$$KO_L = 1 - \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_L \leq 0.30 \qquad (7.13)$$

5. Kök bölgesinde toprak su muhtevası tarla kapasitesi (θ_{FC}) ile tüketilmesine izin verilen minimum toprak nem muhtevası (θ_g^t (7.2a) denkleminde verilmiştir) arasında kontrol edilmiştir.

$$\theta_{FC} \geq \theta_m^t > \theta_g^t \qquad (7.2b)$$

7.6 Model İçin Geliştirilen Program

SULAMA modeli için FORTRAN (Visual Workbench V 1.00) dilinde 4200 satırlık bir program yazılmıştır. Program işlem zamanı Pentium III-733 Mhz-128 MB RAM'lık bir bigisayarda 55 dakika iken, Pentium 166 MMX – 64 MB RAM'lik bir bigisayarda ise 6.5 saattir. Akış diyagramı Şekil (7.5)'te verilen ana program 13 tane alt program yardımıyla geliştirilen modelin çözümünü yapmaktadır. Program girdileri hidrolojik, meteorolojik ve bitki ve toprağa ait veriler olmak üzere 3 data dosyasından oluşmaktadır. Ayrıca klavyeden herhangi bir giriş yapmaya gerek yoktur. Data dosyaları EK-A'da verilmiştir.

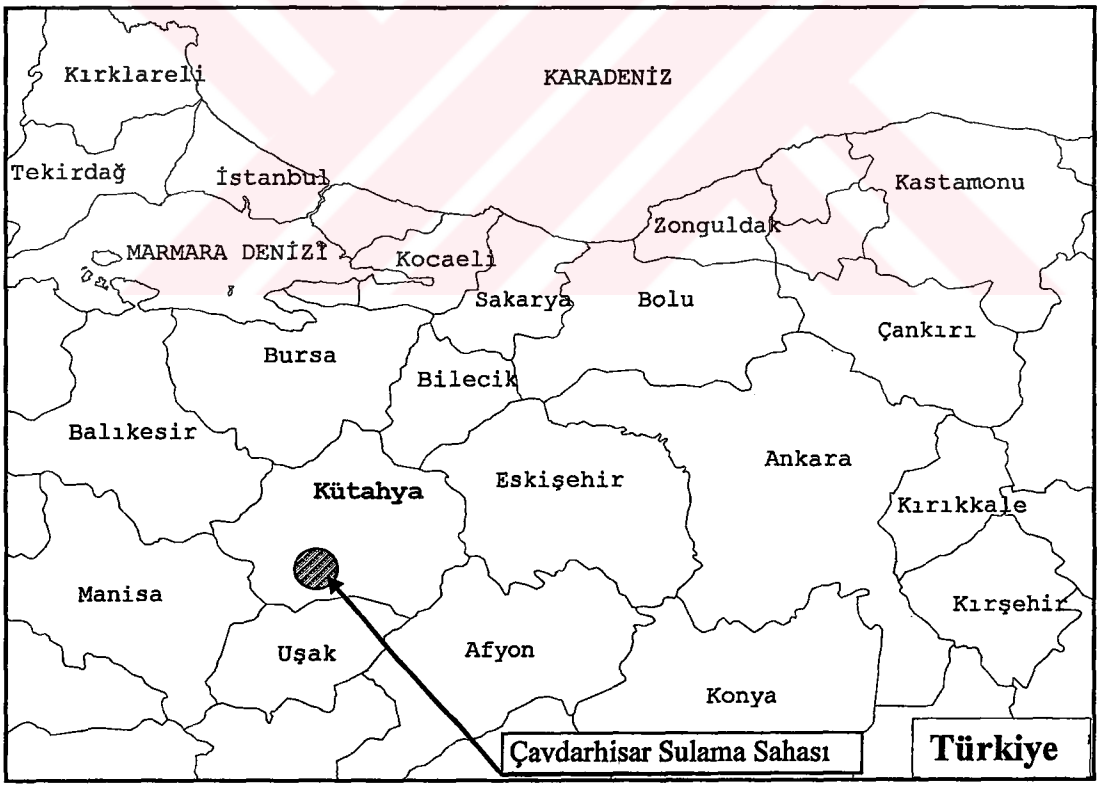


Şekil 7.5 Ana Programın Akış Diyagramı

8. SULAMA MODELİNİN UYGULANMASI

8.1 Giriş

Bu çalışmada geliştirilen model orta ölçekte bir işletme olan Çavdarhisar Barajı ve sulama sahasına uygulanmıştır. Çavdarhisar Baraj yeri Kütahya il merkezinin 42 km güney batısında, Çavdarhisar ilçesinin 4 km güneybatısında ve Susurluk havzası içinde Bedir Deresi üzerindedir. Çavdarhisar Barajı ve sulama sahasının yeri Şekil (8.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Çavdarhisar Barajı ve Sulama Sahasının Yeri

Baraj, M.S. III. Yüzyılda yapılmış olan Çavdarhisar (Aizanoi) sel kapanının 1 km menbaında bulunmaktadır. Planlama raporu 1969 yılında Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından "*Örencik Projesi Planlama Raporu*" adı altında Örencik ve Kızık baraj ve

sulamaları ile birlikte yapılmıştır. Yapılan planlama raporu yine DSİ tarafından 1977 yılında revize edilmiştir (DSİ, 1977). Çavdarhisar barajı 1992 yılından itibaren işletmeye açılmış olmakla birlikte, 1998 yılı itibarıyla sulama sahasının sadece % 13 sulanmaktadır. Bunun en önde gelen nedenleri boş ve nadasa bırakılan alanlar ile ekim hububat ağırlıklı olduğundan ilkbahar aylarında gelen yağışların çiftçi tarafından hububat için yeterli görülmesidir (DSİ, 1988).

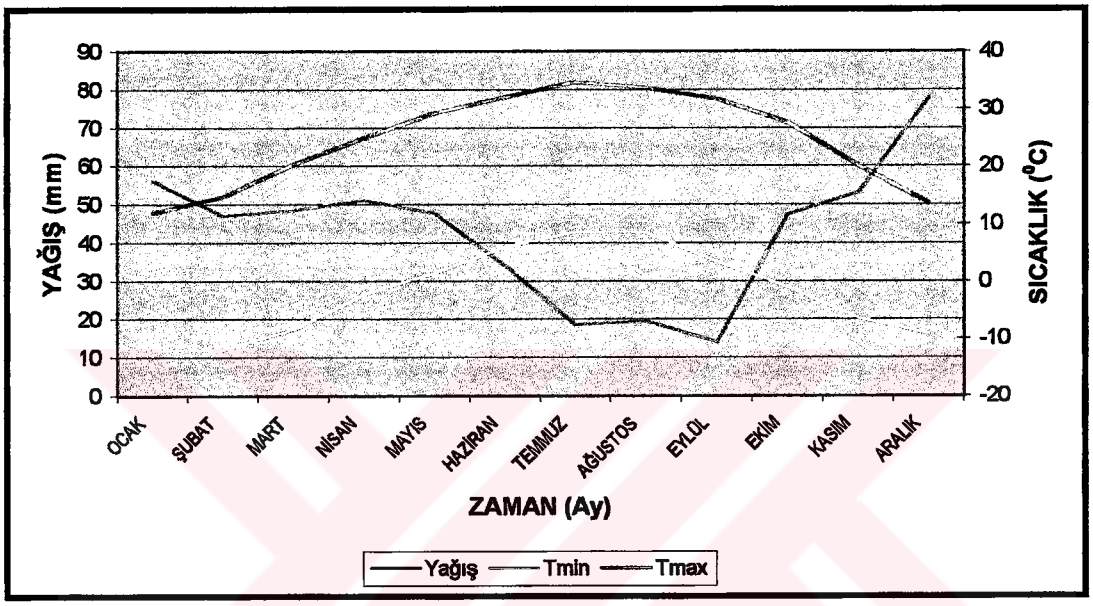
Bu çalışmada bu saha için meteorolojik veriler Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden, hidrolojik veriler ile Çavdarhisar barajı ve sulama sahasına ait güncel bilgiler DSİ III. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı 34. Şube Müdürlüğünden, yetiştirilen bitkilerin üretim ve birim faydalarına ait bilgiler DİE'nin internet sayfasından alınmıştır. Bitkilerin büyüme sezonu ve maliyetleriyle ilgili güncel bilgiler ise Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Ankara Araştırma Enstitü Müdürlüğü ve sulama sahasına en yakın olan Eskişehir Araştırma Enstitü Müdürlüğü'nden alınmıştır. Fayda-maliyet hesaplarında 1998 yılı birim fiyatları kullanılmıştır. Çavdarhisar Sulaması ilçede kurulan *Çavdarhisar Sulama Birliği* tarafından işletilmekte olup yıllık raporlar hazırlamakla birlikte bitkilerin üretim maliyetleri ile ilgili bir çalışma yapılmamaktadır.

8.2 İklim ve Su Kaynakları

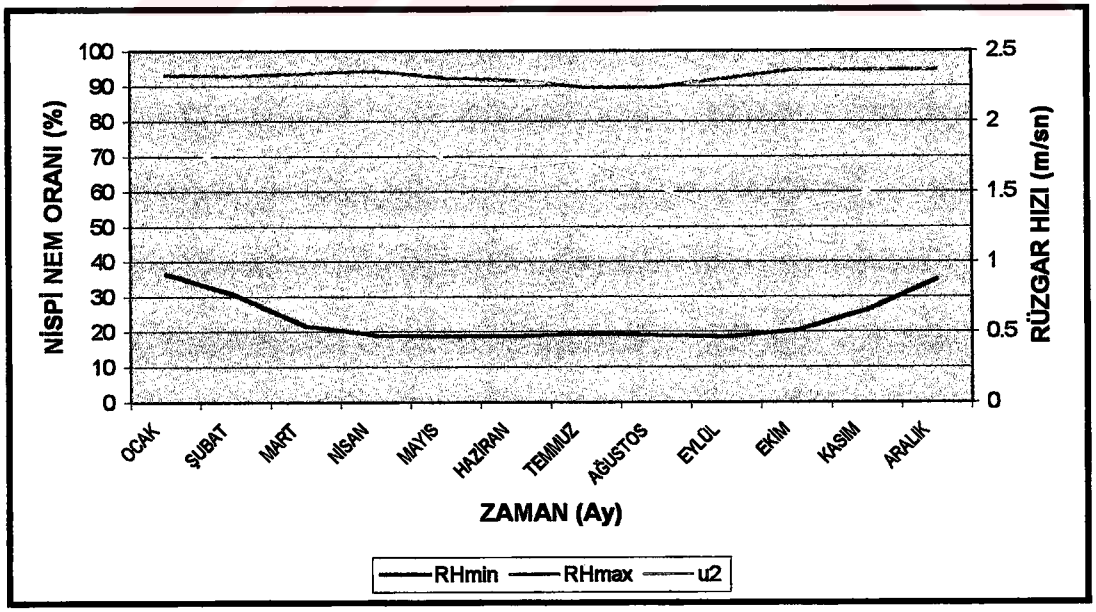
Proje sahası Ege bölgesinde olmakla beraber hakim iklim İç Anadolu iklimi karakterindedir. Kışları sert olup kar örtüsü uzun zaman devam eder. Yıllık ortalama yağış 515 mm olup yılın ortalama 117 günü yağışlıdır. Ortalama sıcaklık 11^0C civarındadır ve en sıcak aylar Temmuz ve Ağustos, en soğuk ay ise Ocak'tır. Yıllık ortalama buharlaşma 1000 mm civarındadır. Ortalama nispi nem oranı % 67'dir. Hakim rüzgarlar N ve NW istikametindendir (DSİ, 1969). Bu çalışmada kullanılan maksimum ve minimum sıcaklıklar ile yağış ortalamaları Şekil (8.2)'de ve maksimum ve minimum nispi nem oranları ile 2 metre yükseklikte ölçülen rüzgar hızları Şekil (8.3)'de verilmiştir.

Hazneye giren aylık ölçülmüş akım değerleri kullanılarak AR(1) modeliyle sentetik akımlar üretilmiştir. Bu çalışmada, üretilen akımların ortalama, sulak ve kurak yıllardaki değerleri hazne işletme çalışmasında kullanılarak optimum çözüm

aranmıştır. Üretilen akımların ortalaması ile ölçülmüş akımların ortalaması Şekil (8.4)'de gösterilmiştir. Ölçülmüş akımların ortalaması sentetik üretilmiş akımların ortalamasıyla uygunluk göstermektedir. Ölçülmüş akımların ortalamasıyla yıllık hazneye giren akım 34.94 milyon m^3 iken sentetik üretilmiş akımların ortalamasıyla yıllık hazneye giren akım 35.87 milyon m^3'tür. Sentetik akımların değeri sadece % 2.7 kadar fazladır.



Şekil 8.2 Maksimum ve Minimum Sıcaklıklar ile Yağış Ortalamaları

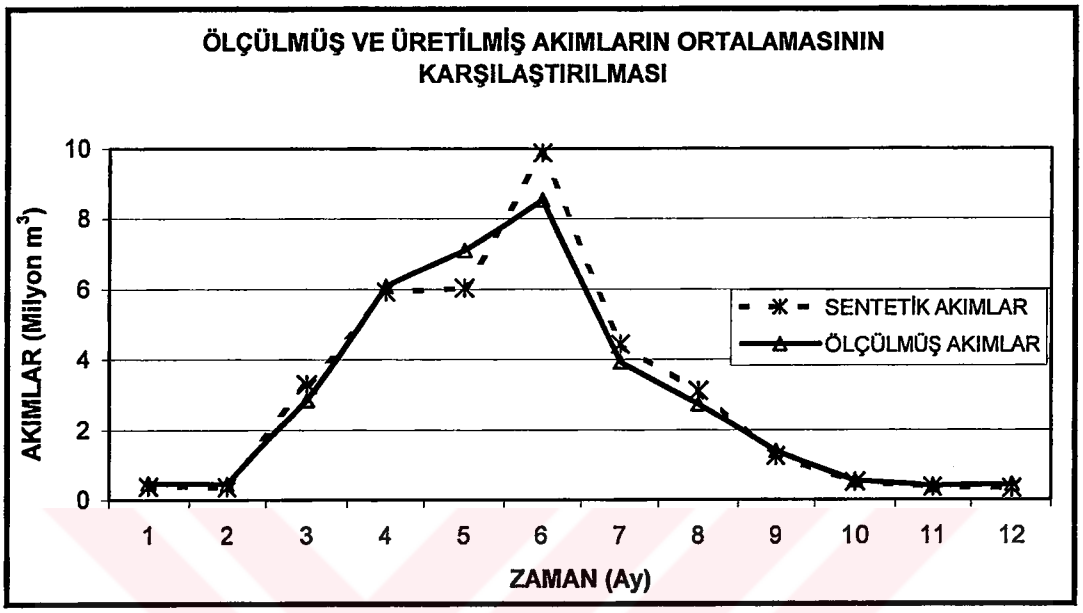


Şekil 8.3 Maksimum ve Minimum Nispi Nem Oranları ile Rüzgar Hızları

Çavdarhisar Barajı karakteristikleri Tablo (8.1)'de verilmiştir. Sulama amaçlı olan bu baraj, 50.5 m yüksekliğinde ve 1.647×10^6 m^3 gövde dolgu hacmine sahiptir. Ölü

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

hacmi 3.00 x10^6 m^3 ve aktif hacmi 31.00 x10^6 m^3 olan barajın toplam depolama hacmi 34.00 x10^6 m^3'tür. Maksimum ve minimum su kotları sırasıyla 1069 ve 1034.5 m olan barajın işletme kotu 1062 m'dir.



Şekil 8.4 Ölçülen ve Üretilen Akımların Ortalamasının Karşılaştırılması

Tablo 8.1 Çavdarhisar Barajı Karakteristik Değerlerleri (DSİ, 1977)

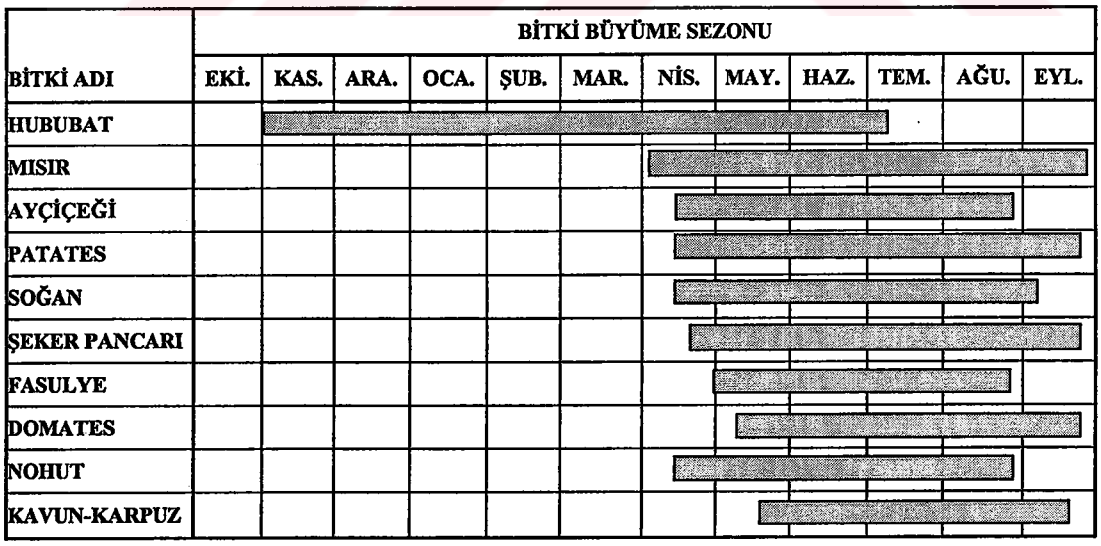
Çavdarhisar Barajı Karakteristikleri	
Gayesi	Sulama
Tipi	Zonlu Toprak Dolgu
Talveg Kotu	1021.00 m
Minimum Su Kotu	1034.50 m
Normal Su Kotu	1062.00 m
Maksimum Su Kotu	1069.00 m
Baraj Kret Kotu	1071.50 m
Baraj Yüksekliği	50.5 m
Gövde Dolgu Hacmi	1.647x10^6 m^3
Yıllık Ortalama Su Hacmi	38.72 x10^6 m^3
Regüle Edilen Su	24.78 x10^6 m^3
Rusubat Hacmi	2.14 x10^6 m^3
Ölü Hacim	3.00 x10^6 m^3
Aktif Hacim	31.00 x10^6 m^3
Toplam Depolama Hacmi	34.00 x10^6 m^3
Maksimum Göl Alanı	3.92 x10^6 m^2
Kadastrofal Taşkın Debisi	949 m^3/s
Dolu Savak Kapasitesi	935 m^3/s
Maksimum Dip Savak Debisi	2.81 m^3/s
Dip Savak Cebri Boru Çapı	085 m
Sulama Sahası	49300 da

8.3 Toprak ve Bitki Verileri

Kütahya bölgesinde en çok ekilen 10 bitki türü bu sulama sahasında ekildiği kabul edilmiştir. Seçilen bitkilerin ekimden-hasada kadar büyüme sezonu Şekil (8.5)'de gösterilmiştir. Hububat (buğday+arpa) 1 Kasım - 13 Temmuz arasında 255 gün ile en uzun büyüme sezonu sahip bitkidir. Fasulye 1 Mayıs – 28 Ağustos arasında 120 gün ile en kısa büyüme sezonuna sahiptir. Bitkilerin çoğunluğunun ekimi Nisan ayında olurken, hasatların çoğunluğu Ağustos sonu ile Eylül sonu arasında değişmektedir (TOPRAKSU, 1982).

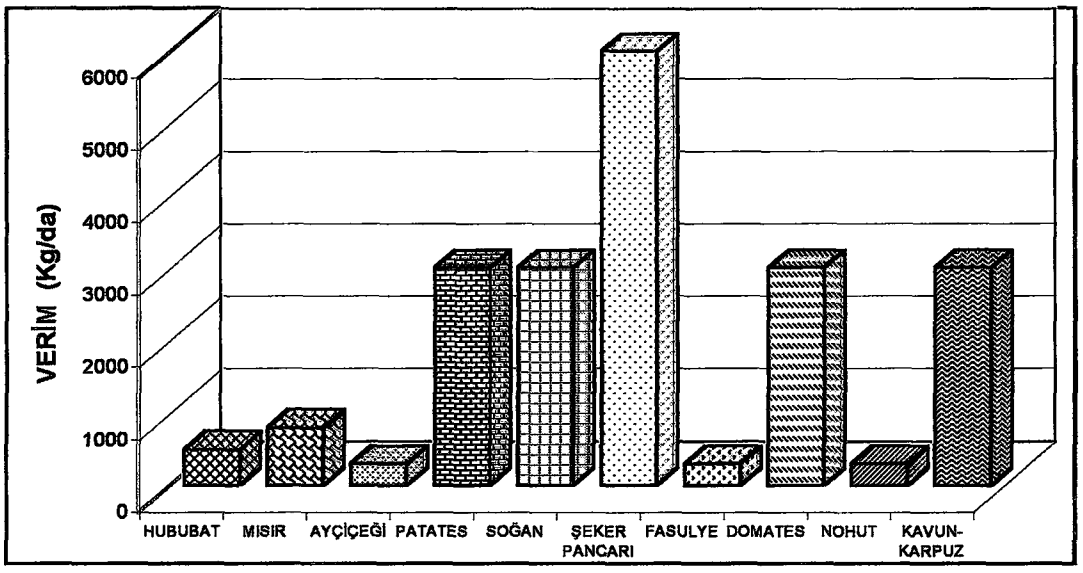
Sulama sahasında toprak bünyesi killi-siltli-lem oluşumunu göstermektedir. Bunun için tarla kapasitesi su muhtevası 0.30, sürekli solma noktası su muhtevası 0.17 olarak alınmıştır. Sulama sahası topraklarında problem oluşturacak oranda hiçbir tuzluluk ve alkalilik problemi mevcut değildir (DSİ, 1977).

Sulama sahası 49300 dekar olup, sulama ana kanalları beton kaplamalı ve su dağıtımı beton kaplamalı kanal ve kanaletlerle yapılmaktadır. Bitkilere su uygulaması ise yüzeysel sulama metodu ile yapılmaktadır. Buna göre sulama randımanı (E_p) (iletim)x(dağıtım)x(uygulama) kayıplarından dolayı sırasıyla *0.9x0.9x0.75=0.6* olarak hesaplanabilir.



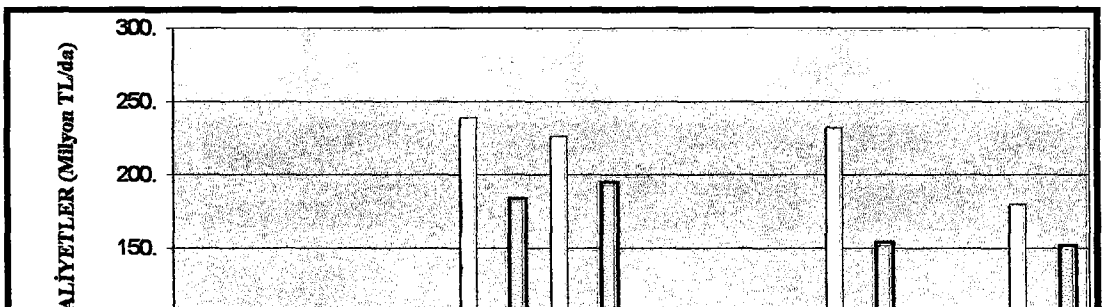
Şekil 8.5 Bitkilerin Büyüme Sezonu

Seçilen bitkiler ve bunların birim dekardan elde edilecek maksimum verimleri Şekil (8.6)'de gösterilmiştir.



Şekil 8.6 Bitkilerin Birim Alandan Elde Edilecek Maksimum Verimleri

Bitkileri verimleriyle kıyaslamak mümkün değildir. Verimleri birim fiyatları ile çarpılarak faydaları bulunur. Bulunan fayda değerlerinden maliyetleri çıkartılırsa net fayda değerleri elde edilir. Bitkilerin maksimum verim için birim dekarda fayda-maliyet-net fayda değerleri Şekil (8.7)'de görülmektedir. Çavdarhisar sulama sahasında 1998 yılında bütün bitkilerden 1.5 milyon TL/da sulama maliyeti alınmıştır (DSİ, 1988). Maksimum verim şartları altında, soğan 194.7 milyon TL/da. ile net faydası en büyük bitkidir. Onu 183.4 milyon TL/da. ile patates takip etmektedir. Hububat 8.5 milyon TL/da. ile net faydası en küçük bitkidir.

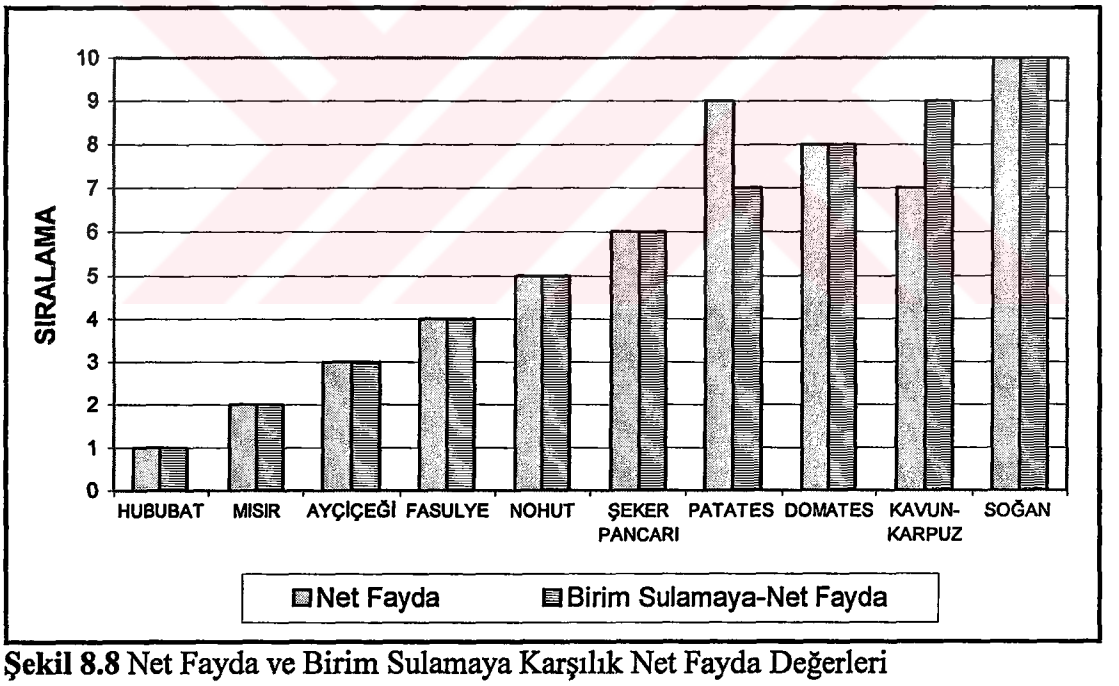


	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
FAYDA	25.3	49.2	52.2	238.9	226.3	100.5	54.7	232.4	42.1	180.
SABİT MALİYET	15.3	22.	16.6	54.	30.1	49.8	21.	77.	8.1	27.
SULAMA MALİYETİ	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
NET FAYDA	8.5	25.7	34.2	183.4	194.7	49.2	32.2	153.9	32.5	151.5

Şekil 8.7 Bitkilerin Birim Alanda Fayda-Maliyet-Net Fayda Değerleri

8.4 Optimum Bitki Deseni

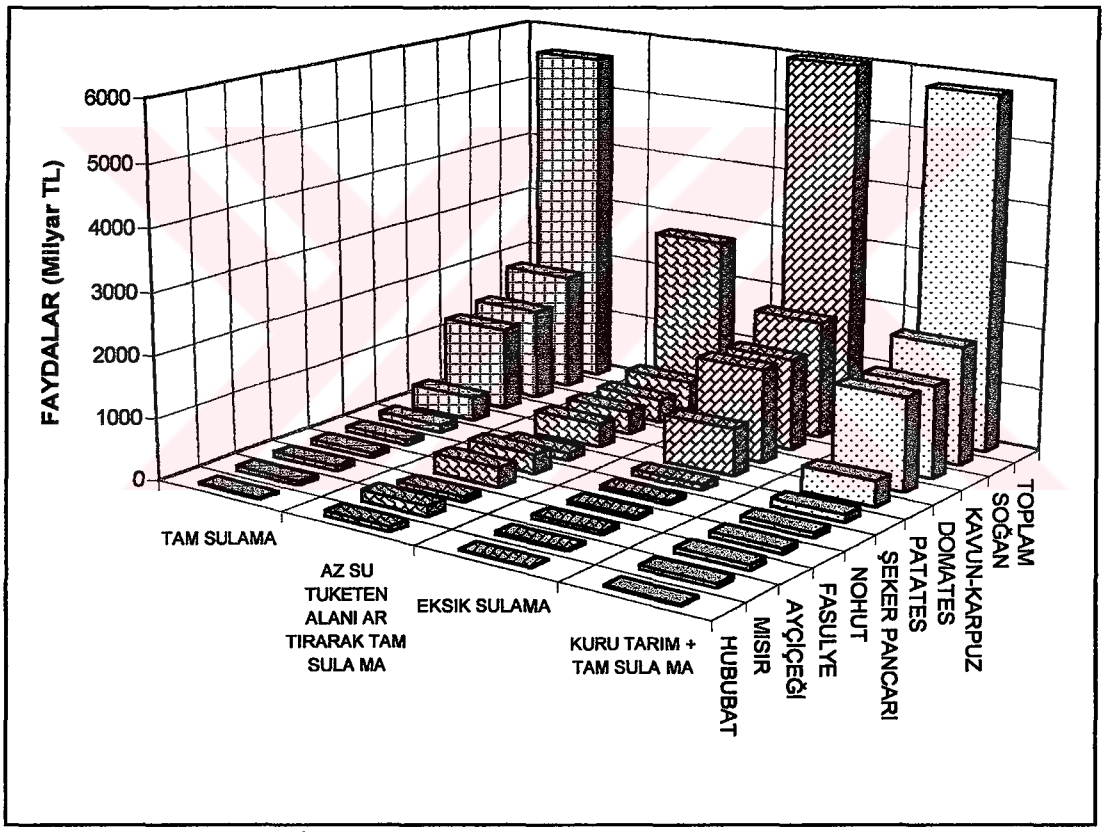
Maksimum net faydayı verecek optimum bitki desenini belirlemek için ekilecek bitkiler % 5 ile 20 arasında sınırlandırılmıştır. Bu oranlar istenildiği şekilde değiştirilebilir ve gerekirse maksimum ve minimum sınırlara aynı değerler verilerek sabitleştirilir. Şekil (8.8)'de birim alandan birim sulamaya karşılık elde edilecek net faydalar büyüklüklerine göre sıralanmıştır. Birim sulamaya karşılık net faydası en büyük olan bitkiler en çok ekilen bitkiler olurken, net faydası küçük olan bitkiler düşük oranda ekilen bitkilerdir. Net fayda ve birim sulamadan elde edilecek net fayda değerleri küçükten büyüğe doğru sıralandığında patates ile kavun-karpuzun dışındaki bitkilerin yeri değişmemektedir. Patates net faydaya göre 9. sırada yer alırken, kavun-karpuz 7. sırada yer almaktadır. Patatesin sulama ihtiyacı kavun-karpuza göre daha yüksek olduğundan birim sulamaya karşılık elde edilecek net fayda da patates 7. kavun-karpuz ise 9. büyüklük sırasında yer almıştır.



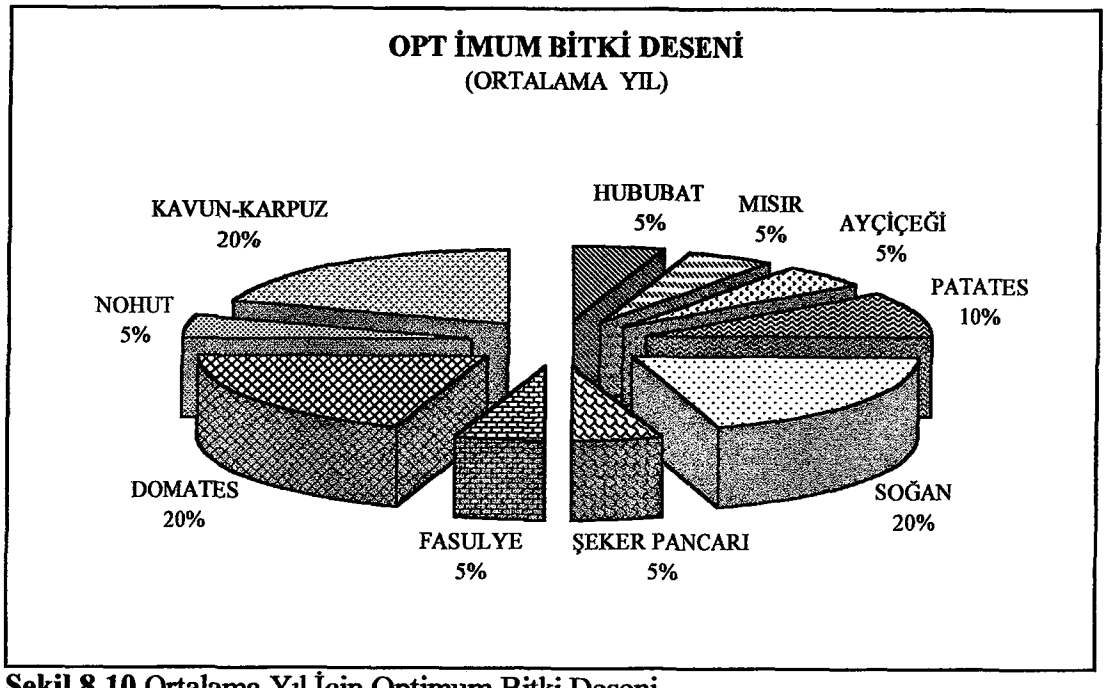
Şekil 8.8 Net Fayda ve Birim Sulamaya Karşılık Net Fayda Değerleri

Optimum bitki deseni *tam sulama, az su tüketen bitkilerin alanı artırılıp tüm alanda tam sulama, eksik sulama ve kuru tarım+tam sulama* olmak üzere 4 farklı durum için araştırılmıştır. Ortalama yıl için çeşitli durumlara göre bitkilerin 1998 yılı birim fiyatları esas alınarak net fayda değerleri Şekil (8.9)'da gösterilmiştir. Ortalama yıla göre, tam sulamada 45720 da alan ekilip $5586x10^9$ *TL* net fayda elde edilmiştir. Ancak ekilecek toprak sahası 49300 da olduğun için, bu miktarda bir alanın optimum

sulanabileceği araştırılmıştır. Az su tüketen bitkilerin alanı artırılıp tüm alana tam sulama yapıldığında toplam net fayda $2713x10^9$ *TL* olarak elde edilmiştir. Eksik sulama yapıldığında ise elde edilen toplam net fayda $5992x10^9$ *TL* olmuştur. Burada, net faydası yüksek olan patates, domates, kavun-karpuz ve soğana tam sulama yapılırken, diğer bitkilere % 15-25 arasında değişen kısıntılar yapılmıştır. Kuru tarım + tam sulamada ise sadece hububatta kuru tarım yapılırken diğer bitkilerde tam sulama yapılarak toplam net fayda $5784x10^9$ TL olarak elde edilmiştir. Bütün durumlar tek tek incelendikten sonra en yüksek net faydayı veren eksik sulama durumundaki bitki deseni optimum olarak seçilmiştir. Ortalama yıl için optimum bitki deseni Şekil (8.10)'de görülmektedir.

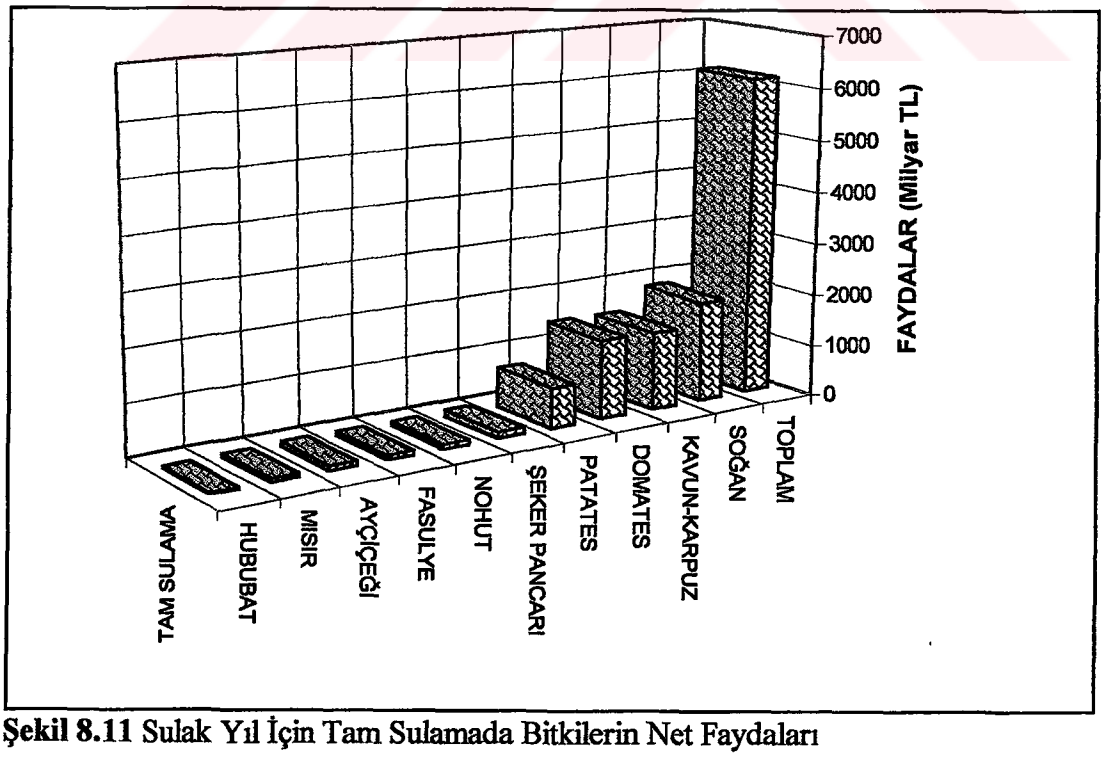


Şekil 8.9 Ortalama Yıl İçin Çeşitli Durumlara Göre Bitkilerin Net Faydaları



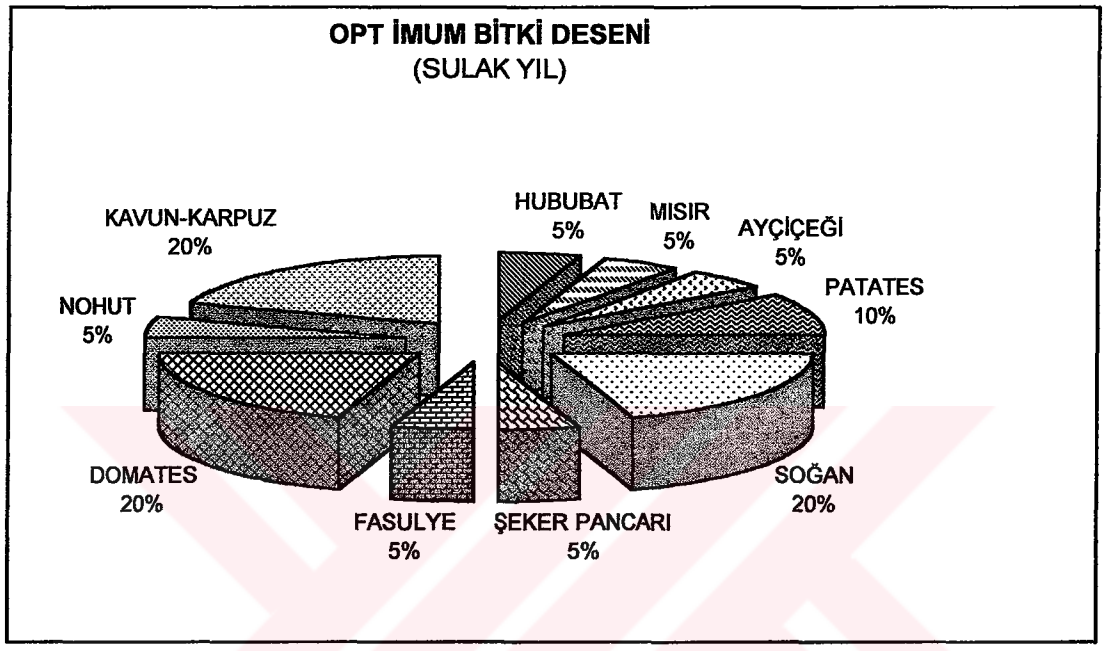
Şekil 8.10 Ortalama Yıl İçin Optimum Bitki Deseni

Sulak yıl için tam sulama durumlarına göre bitkilerin verdiği net fayda değerleri Şekil (8.11)'.de gösterilmiştir. 49300 da alanın tam sulanması durumunda $6135x10^9$ *TL* net fayda elde edilmiştir. Sulak yılda yeterli hatta fazla su olduğu için eksik sulama vb. durumları incelemeye gerek yoktur.



Şekil 8.11 Sulak Yıl İçin Tam Sulamada Bitkilerin Net Faydaları

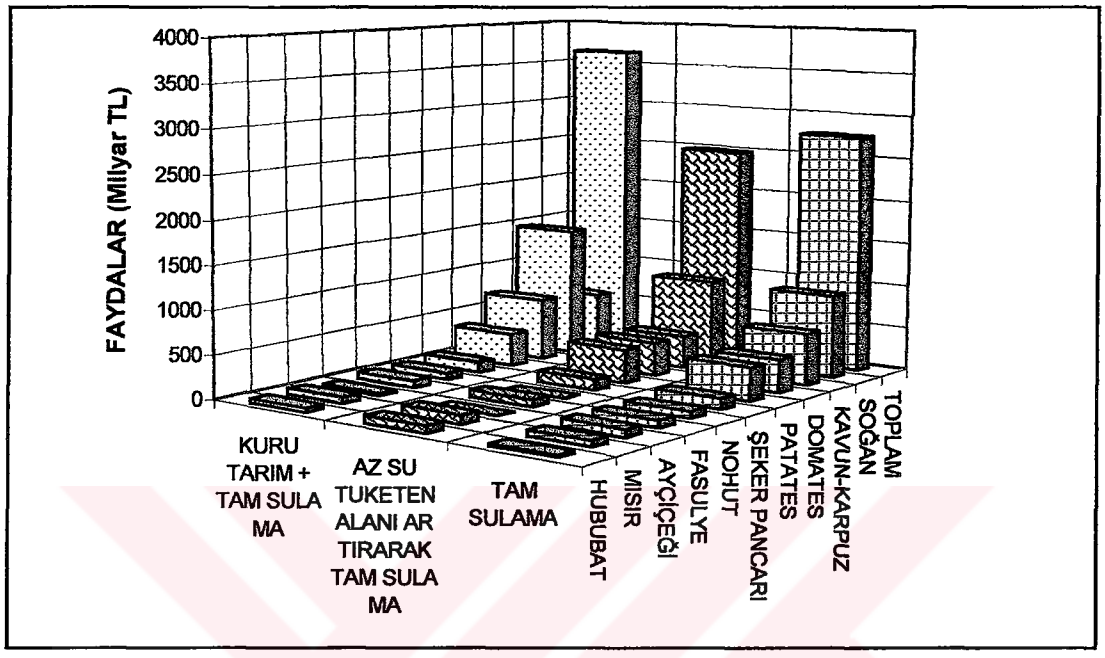
Sulak yıl için elde edilen optimum bitki deseni Şekil (8.12)'de verilmiştir. Kavun-karpuz, domates ve soğan % 20 ile en büyük ekim oranını alırken, patates % 10 ekim oranı ile bitki deseninde yer almıştır. Diğer tüm bitkiler ise en düşük alan oranı % 5 oranında bitki deseninde yer almıştır. Sulak yıl ile ortalama yılda bitki deseni aynı elde edilmiştir, fakat bitkilere verilecek su miktarları farklıdır.



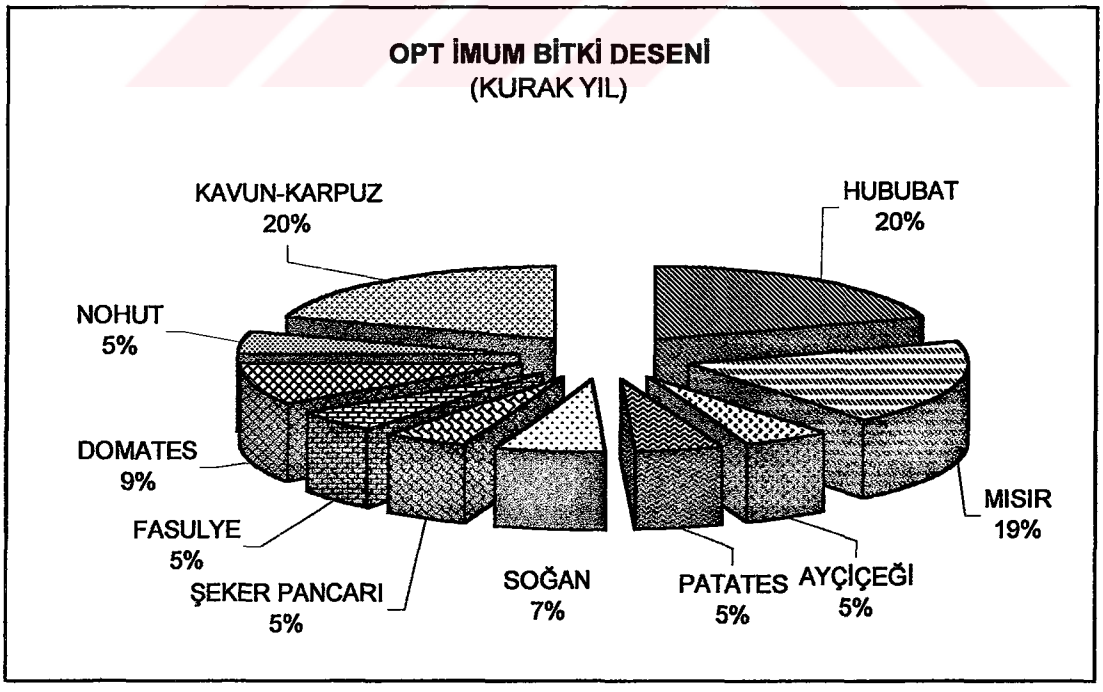
Şekil 8.12 Sulak Yıl İçin Optimum Bitki Deseni

Kurak yıl için çeşitli durumlara göre bitkilerden elde edilen net fayda değerleri Şekil (8.13)'de gösterilmiştir. Kurak yılda tam sulamaya göre toplam alanın sadece 28509 dekarı ekilip *2750x10^9 TL* net fayda elde edilmektedir. Sulama sahasının tamamının sulanması için tüm bitkilere % 25 oranında eksik sulama uygulanması durumunda bile 49300 da'lık alan sulanamamaktadır. Az su tüketen bitkilerin alanı artırılması da istenilen yüksek net faydayı vermemiştir. Kuru tarım + tam sulamada ise sadece hububat, mısır ve ayçiçeği bitkilerinde kuru tarım yapılırken diğer bitkilerde tam sulama yapılarak toplam net fayda 3637x10^9 TL olarak elde edilmiştir. Kurak yıl için kuru tarım+tam sulama durumu en optimum çözümü ortaya koymuştur. Bu durumda bitki deseni Şekil (8.14)'de gösterilmiştir. Bitki deseninde kuru tarım bitkileri, hububat % 20, mısır % 19 ve ayçiçeği % 5 olarak yer almıştır. Tam sulanan bitkiler kavun-karpuz % 20, domates % 9, soğan % 7 ve fasulye, nohut, şeker pancarı, patates % 5 olarak bitki deseninde yer almıştır.

Kurak, sulak ve ortalama olmak üzere her 3 durumda da SULAMA modelinin birinci aşamasında net faydayı en büyük yapan optimum bitki deseni elde edilmektedir. Böylelikle, bu çalışmada geliştirilen modelin herhangi bir su potansiyeli durumuna göre optimum çözümü sunduğu ortaya konmuştur.



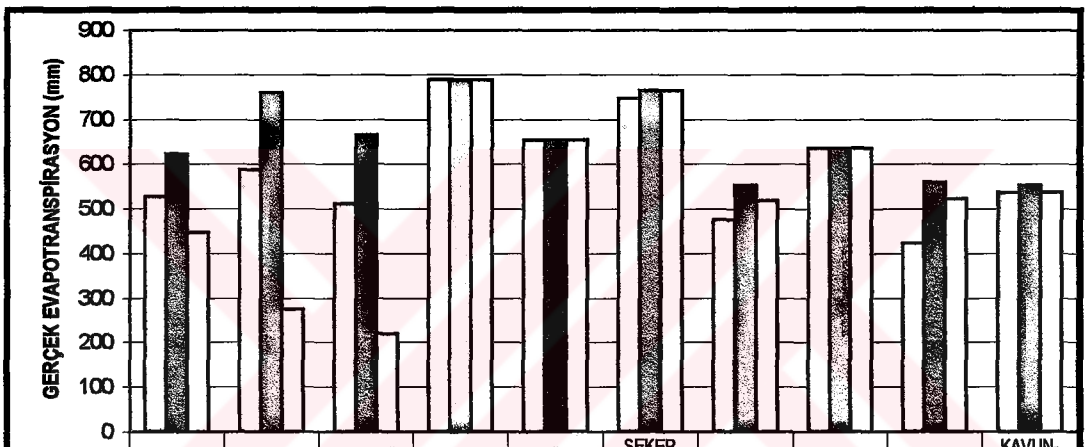
Şekil 8.13 Kurak Yıl İçin Çeşitli Durumlara Göre Bitkilerin Net Faydaları



Şekil 8.14 Kurak Yıl İçin Optimum Bitki Deseni

8.5 Bitki Türlerine Göre Evapotranspirasyon, Bitki Katsayıları ve Toprak Nemi Sonuçları

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda bitkilerin yıllık gerçek evapotranspirasyon miktarları Şekil (8.15)'de gösterilmiştir. Üç durumda da patates, soğan ve domates bitkilerinde su kesintisi yapılmadığından bu bitkilerin gerçek ET'si aynıdır. Ortalama yılda, nohut 422.25 mm ile en küçük, patatesin 788,86 mm ile en büyük gerçek ET'ye sahiptir. Kurak yılda kuru tarım yapılan hububat, mısır ve ayçiçeği bitkilerinin gerçek ET'si sırasıyla 446.78, 274.13 ve 219.18 mm olarak gerçekleşmiştir.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
ORTALAMA	527.87	587.47	512.03	788.86	653.68	746.49	476.51	634.4	422.25	536.85
SULAK	621.28	759.2	664.41	788.86	653.68	764.28	553.11	634.4	559.91	553.9
KURAK	446.78	274.13	219.18	788.86	653.68	764.28	518.58	634.4	522.81	536.85

Şekil 8.15 Bitkilerin Gerçek Evapotranspirasyon Miktarları

Bu çalışmada sulama sahasında ekilmesi seçilen 10 bitkiden yetersiz ve kısmen yeterli sulanan bitkileri karakterize eden hububat ve mısır ve yeterli sulanan bitkileri karakterize eden patatese ait bitki evapotranspirasyonu, bitki katsayıları ve toprak nemi sonuçları aşağıda verilmiştir. Ayçiçeği, soğan, şeker pancarı, fasulye, domates, nohut ve kavun-karpuza ait sonuçlar ise EK B'de verilmiştir.

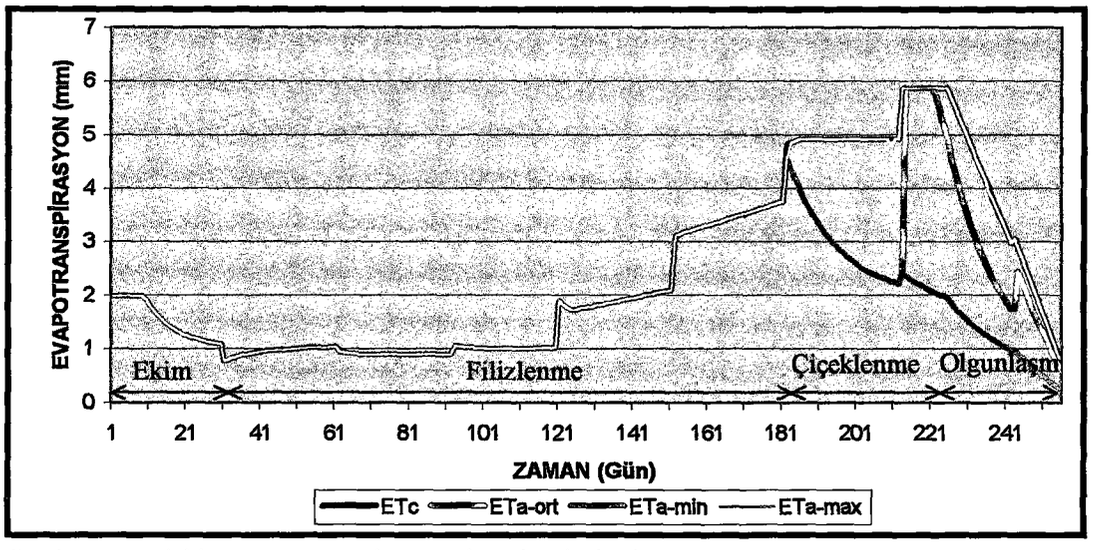
8.5.1 Hububat

Hububata ait ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma büyüme devreleri sırasıyla 30, 155, 40 ve 30 gündür. Şekil (8.16)'de hububata ait potansiyel bitki evapotranspirasyonu (ETc), ortalama, kurak ve sulak yıllarda gerçek

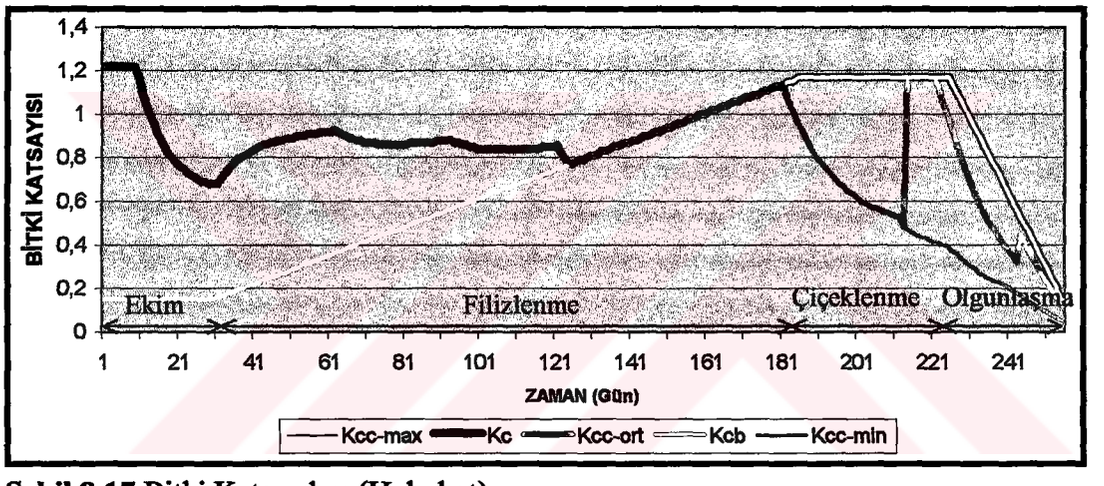
evapotranspirasyonlar sırasıyla ETa-ort, ETa-min, ETa-max ile gösterilmiştir. Bundan sonraki bitkiler içinde benzer notasyonlar kullanılacaktır. Her üç durumda da ekim ve filizlenme büyüme devrelerinde gerçek bitki evapotranspirasyonu potansiyel ET'ye eşit olmaktadır. Ortalama ve kurak yıllarda su kısıntısı olduğu için, çiçeklenme devresinde bitki evapotranspirasyonu potansiyel ET'nin altında gerçekleşirken, sulak yılda su kısıntısı söz konusu olmadığından bu durumda gerçek evapotranspirasyon hasada kadar potansiyel ET ile çakışmaktadır. Olgunlaşma devresinde, kurak yılda kuru tarımdan dolayı oldukça düşük evapotranspirasyon gerçekleşirken, ortalama yılda ise sulamalardan dolayı nispeten potansiyel ET'ye yakın ve paralelinde bir evapotranspirasyon gerçekleşmektedir.

Hububata ait temel bitki katsayı (Kcb), potansiyel ET durumunda bitki katsayısı (Kc) ve ortalama, kurak ve sulak yıllarda bitki katsayıları sırasıyla Kcc-ort, Kcc-min, Kcc-max Şekil (8.17)'da gösterilmiştir. Filizlenme devresinin ortasına kadar veya bitki örtüsü tarlayı kaplayana kadar, temel bitki katsayısı (Kcb)'den ziyade büyük ölçüde buharlaşma katsayısı (Ke) bitki evapotranspirasyonunu belirlemede etkili olmaktadır. Filizlenme devresinin sonundan hasada kadar ise Kcb etkili olmaktadır. Su potansiyelinin yetersiz olması durumunda ise bitki katsayılarının değişimi aynen bitki evapotranspirasyonunda olduğu gibidir. Ekim ve filizlenme devrelerinde, sulak, kurak ve ortalama yıllarda bitki katsayıları (Kcc) Kcc'yi takip etmektedir. Çiçeklenme devresinde Kcc-ort ve Kcc-min Kc'nin altına düşerken, Kcc-max Kc'yi takip etmektedir. Olgunlaşma devresinde de Kcc-max Kc'yi takip ederken, Kc-ort Kc'nin altında seyrederken, Kc-min Kc-ort'nın da altında seyretmektedir.

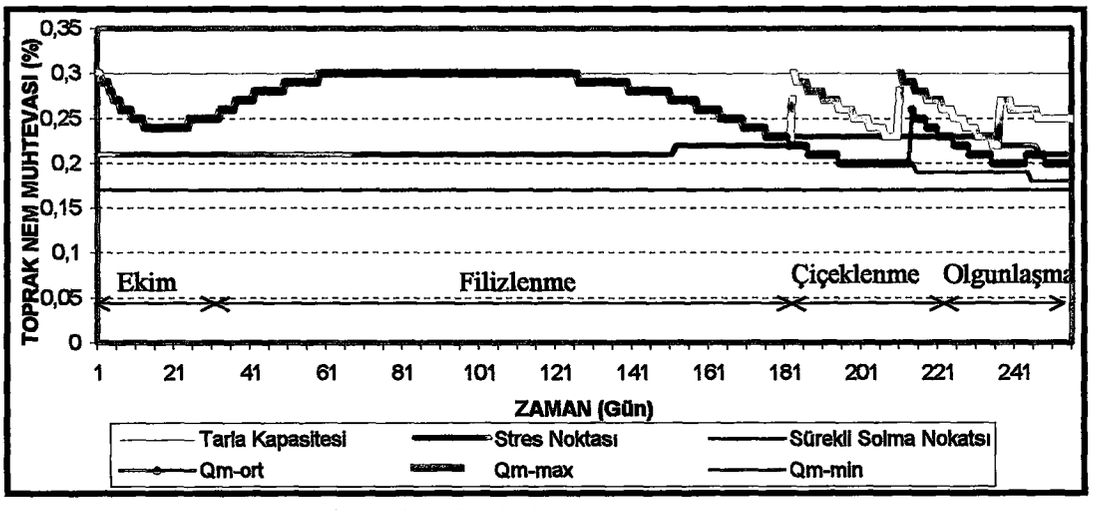
Hububat için toprak su muhtevasının ekimden hasada kadar değişimi Şekil (8.18)'de gösterilmiştir. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi toprak su muhtevası bitki katsayılarının belirlenmesinde ana unsurdur. Bitki katsayıları da bitki evapotranspirasyonu büyüklüğünü belirlemektedirler. Bu yüzden, Şekil (16, 17, 18) birbirlerini tamamlayan ve aynı zamanda aynı karakterdedirler. Ortalama, sulak ve kurak yıllara ait toprak su muhtevaları sırasıyla Qm-ort, Qm-max ve Qm-min ile gösterilmiştir. Her gün azalan toprak nem muhtevaları ET yoluyla tükenen su miktarlarını ifade eder. Ani yükselen toprak nem muhtevası çizgileri ise o günde sulama yapıldığını ifade etmektedir. Ortalama, sulak ve kurak yıllardaki toprak su muhtevasının, ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma devreleri boyunca



Şekil 8.16 Bitki Evapotranspirasyonları (Hububat)



Şekil 8.17 Bitki Katsayıları (Hububat)



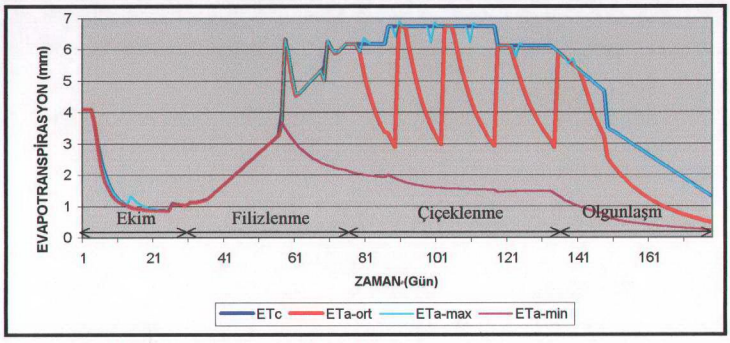
Şekil 8.18 Toprak Su Muhtevaları (Hububat)

değişimi ET ve Kcc'lerin değişimi gibidir. Burada stres noktasının değişimi bitki cinsinin ve o günkü ET miktarının bir fonksiyonudur. Toprak su muhtevası stres noktasının üstünde ve üzerinde ise bitki potansiyel ET'yi topraktan alıp tüketmektedir. Tam tersi olması durumunda ise bitki su stresine girer ve potansiyel ET'nin altında ve bir sonra stres noktasının üzerine çıkıncaya kadar sürekli azalan bir evapotranspirasyon miktarı tüketir. Tekrar stres noktasının üstüne çıkmak için ise yeterli yağış ve sulama gereklidir.

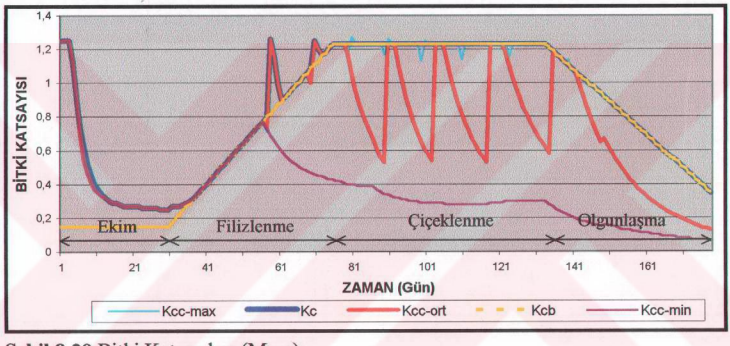
8.5.2 Mısır

Mısıra ait ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma büyüme devreleri sırasıyla 30, 45, 58 ve 45 gündür. Şekil (8.19)'de mısıra ait potansiyel bitki evapotranspirasyonu (ETc), ortalama, kurak ve sulak yıllarda gerçek evapotranspirasyonlar gösterilmiştir. Her üç durumda da filizlenme devresinin ortasına kadar gerçek bitki evapotranspirasyonu potansiyel ET'ye eşit olmaktadır. Kurak yılda su kısıntısı olduğu için, gerçek evapotranspirasyon filizlenme devresinin ortasından sonra hasada kadar sürekli azalarak devam eder. Ortalama yılda çiçeklenme devresinin başından itibaren gerçek bitki evapotranspirasyonu potansiyel ET'nin altında gerçekleşirken, sadece sulama zamanlarında potansiyel ET seviyesine yükselir. Sulak yılda su kısıntısı söz konusu olmadığından, gerçek evapotranspirasyon ekimden hasada kadar potansiyel ET ile çakışmaktadır.

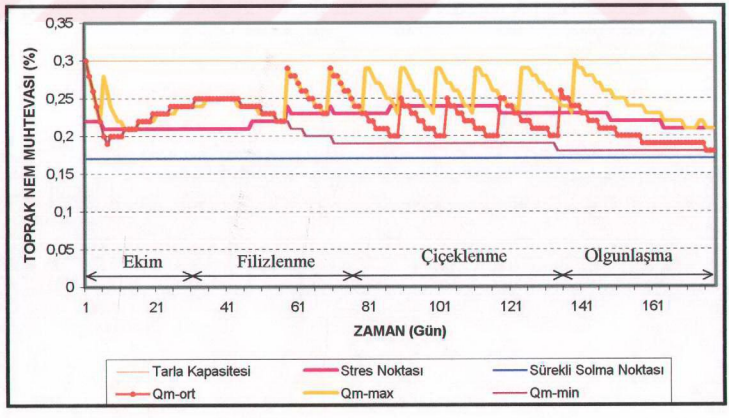
Ortalama, kurak ve sulak yıllarda mısır bitkisine ait bitki katsayılarının değişimi Şekil (8.20)'da gösterilmiştir. Hububattakine benzer şekilde mısırda da filizlenme devresinin ortasına kadar veya bitki örtüsü tarlayı kaplayana kadar, temel bitki katsayısı (Kcb)'den ziyade büyük ölçüde buharlaşma katsayısı (Ke) bitki evapotranspirasyonunu belirlemede etkili olmaktadır. Filizlenme devresinin sonundan hasada kadar ise Kcb etkili olmaktadır. Su potansiyelinin yetersiz olması durumunda ise bitki katsayılarının değişimi aynen bitki evapotranspirasyonunda olduğu gibidir. Topraktaki su potansiyeli yeterli olduğunda bitki katsayıları (Kcc) Kc'yi takip etmektedir. Topraktaki su potansiyeli yetersiz olması durumunda bitki katsayıları Kc'nin altına düşmektedir. Mısır için toprak su muhtevasının ekimden hasada kadar değişimi Şekil (8.21)'de gösterilmiştir. Burada da ortalama, sulak ve kurak yıllardaki toprak su muhtevasının, ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma devreleri boyunca değişimi ET ve Kcc'lerin değişimi gibidir.



Şekil 8.19 Bitki Evapotranspirasyonları (Mısır)



Şekil 8.20 Bitki Katsayıları (Mısır)



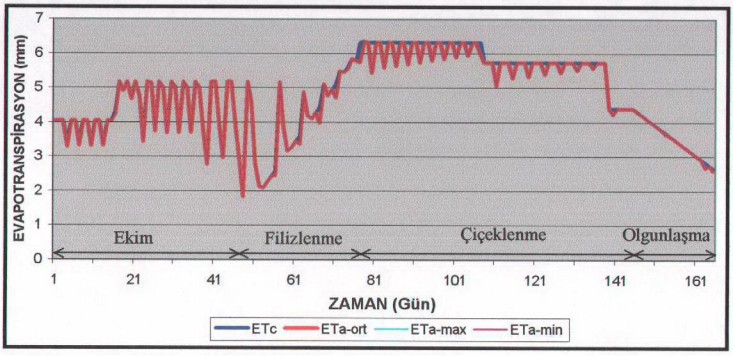
Şekil 8.21 Toprak Su Muhtevaları (Mısır)

8.5.3 Patates

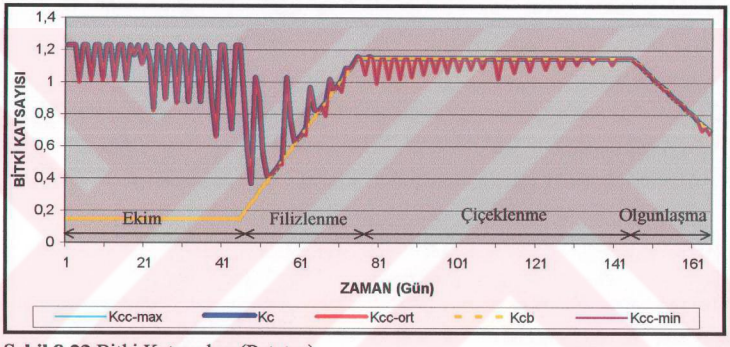
Toplam büyüme sezonu 165 gün olan patatesin ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma büyüme devreleri sırasıyla 45, 30, 70 ve 20 gündür. Şekil (8.22)'de patatese ait potansiyel bitki evapotranspirasyonu (ETc), ortalama, kurak ve sulak yıllarda gerçek evapotranspirasyonlarının büyüme sezonu boyunca değişimi gösterilmiştir. Ortalama, sulak ve kurak yıllarda patates bitkisine su kısıntısı uygulanmadığı için, büyüme sezonu boyunca her üç durumda da gerçek bitki evapotranspirasyonu büyük ölçüde potansiyel ET ile çakışmaktadır. Bu yüzden şekilde 4 ayrı ET'ye ait çizgiler tek bir çizgi gibi çıkmıştır.

Patatese ait temel bitki katsayı (Kcb), potansiyel ET durumunda bitki katsayısı (Kc) ve ortalama, kurak ve sulak yıllarda bitki katsayıları Şekil (8.23)'de gösterilmiştir. Patates için de, filizlenme devresinin ortasına kadar veya bitki örtüsü tarlayı kaplayana kadar, temel bitki katsayısı (Kcb)'den ziyade büyük ölçüde buharlaşma katsayısı (Ke) bitki evapotranspirasyonunu belirlemede etkili olmaktadır. Filizlenme devresinin sonundan hasada kadar ise Kcb etkili olmaktadır.

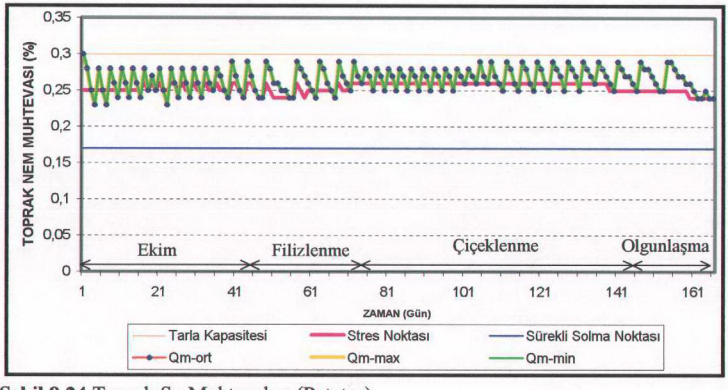
Patates için toprak su muhtevasının ekimden hasada kadar değişimi Şekil (8.24)'de gösterilmiştir. Sulak ve kurak yıllardaki toprak su muhtevasının, ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma devreleri boyunca değişimi büyük ölçüde stres noktasının üstünde seyretmektedir. Zaman zaman stres noktasının altına düşmeler ise hassasiyetten kaynaklanmaktadır. Şekil dikkatlice incelenirse her bir aralıkta, toprak su muhtevası stres noktasının altına sadece bir gün düşmektedir. Bunun nedeni (7.2) denklemiyle belirlenen bir gün önceki toprak nemi potansiyel ET için yeterli olmasıdır. Patates bitkisinin kök derinliğinin küçük olması ve suya olan hassasiyetinden dolayı toprak nemi sık sık (bir gün arayla) sulama gerektirmektedir. Bunun sonucunda şekilde görülen aşağı-yukarıya zikzaklar ortaya çıkmıştır.



Şekil 8.22 Bitki Evapotranspirasyonları (Patates)



Şekil 8.23 Bitki Katsayıları (Patates)



Şekil 8.24 Toprak Su Muhtevaları (Patates)

8.6 Bitki Su ve Sulama Suyu İhtiyacı

Bitkilerin sulama suyu ihtiyacı, kök bölgesinde günlük toprak su dengesiyle belirlenmiştir. Kök bölgesine giren parametreler, yağış ve sulama iken kök bölgesinden çıkan parametre bitki evapotranspirasyonudur. Birinci bölümde tanımı yapılan *bitki su ihtiyacı* ile buradaki *bitki sulama suyu ihtiyacı* farklı terimlerdir. Birincisi bitki ET'si iken, ikincisi belirli şartlarda toprak su dengesiyle toprağa veya bitkiye verilmesi kararlaştırılan sulama suyudur.

Bitkilerin gerçek ET ve toprak nem durumları dikkate alınarak bulunan sulama suyu ihtiyaçları Şekil (8.25)'de görülmektedir. Ortalama yılda gerçek ET'si 527.87 mm olan hububatın sulama suyu ihtiyacı 108.42 mm olmaktadır. Hiç kısıntı yapılmayan patatesin 788.86 mm iken sulama suyu ihtiyacı 644.05 mm'dir. Aradaki fark toprak nemi ve etkili yağış ile karşılanmaktadır.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
ORTALAMA	108.42	316.8	387.63	644.05	525.47	558.66	339.59	481.64	247.75	356.73
SULAK	269.4	508.25	477.45	644.05	525.47	558.66	408.92	481.64	372.84	414.92
KURAK	0	0	0	644.05	525.47	558.66	360.32	481.64	316.65	356.73

Şekil 8.25 Bitkilerin Sulama Suyu İhtiyaçları

Sulak yılda hububat, mısır, soğan ve kavun-karpuz bitkilerinin gerçek ET'nin sadece sırasıyla % 43.4, 67, 80 ve 75'lik kısımları sulama suyuyla karşılanmaktadır. Kurak yılda ise kuru tarım yapılan hububat, mısır ve ayçiçeği bitkilerinin gerçek ET'sinin tamamı toprak nemi ve yağış ile karşılanmaktadır.

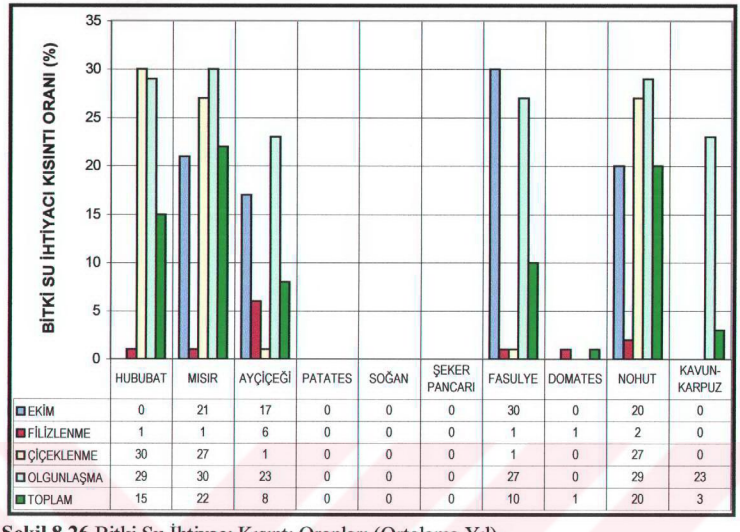
Ortalama yıl için optimum su dağıtım sonucunda elde edilen bitki su ihtiyacındaki kısıntı oranları ile sulama suyundaki kısıntı oranları 4 büyüme sezonu için ve toplamda ayrı ayrı Şekil (8.26) ve (8.27)'de verilmiştir. Burada kriter olarak sulama suyundaki kısıntı oranı değil, bitki evapotranspirasyonundaki kısıntı oranı esas alınmıştır. Buna göre, bir bitkinin herhangi bir büyüme devresindeki kısıntı oranı en fazla % 30 olabilir.

Hububatın ekim, filizlenme, çiçeklenme ve olgunlaşma devrelerinde bitki su ihtiyacındaki kısıntılar % 0, 1, 30 ve 29 olurken, sulama suyu ihtiyacında ise % 0, 100, 15 ve 72 olmaktadır. Bitki su ihtiyacında son iki büyüme devresinde maksimum düzeyde kısıntı olurken ilk iki devresinde kısıntı olmamasının sebebi, hububat için ilk iki devresinde toprak nemi ve yağışların bitki ET'si için yeterli olmasındandır. Hububat için toplamda bitki su ihtiyacından % 15 kısıntıya gidilirken sulama suyundan % 60 tasarruf edilmektedir.

Sulama suyu kısıntı oranları tam sulama durumuna göre kısıntıyı ifade etmektedir. Sulama suyu kısıntı oranındaki negatif rakamlar tam sulama durumuna göre sulama suyu miktarının dönemler arasında yer değiştirdiğini ifade eder. Negatif rakamın olduğu büyüme devresinde tam sulamaya göre kısıntı değil, tam sulama zamanında verilen sulamadan daha fazla su verildiğini ifade eder. Fakat bu suyun tamamının o dönemde kullanıldığı veya bitkinin potansiyel ET'den daha büyük bir ET gerçekleştirdiği anlamına gelmez.

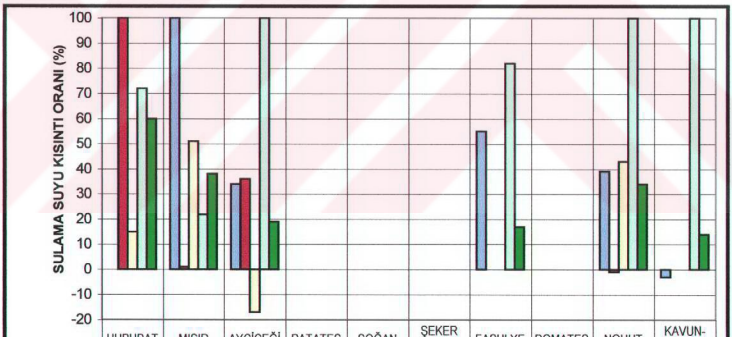
Bitki su ihtiyacındaki kısıntı oranı en fazla % 30 olurken, sulama suyundaki kısıntı oranı % 100 kadar olabilmektedir. Bitki verimi açısından önemli olan bitki su ihtiyacı kısıntısının belirli bir oranda olmasıdır. Ancak bu oran da bitkiye verilecek sulama suyu oranıyla kontrol edilebilir.

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda optimum su dağıtımı sırasıyla Şekil (8.28), (8.29) ve (8.30)'da gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere sulama aralıkları dinamik olup, bir sezon boyunca hangi bitkiye, ne zaman ve ne kadar su verileceği belirlenmiştir. Ayrıca Tablo (8.2)'de ortalama yıl için bitkilere verilecek sulama suyunun programı verilmiştir. Bitkilerin büyüme sezonu Ekim-Eylül arasında bir yıl boyunca sürmesine rağmen, sulamaya sadece Nisan-Eylül ayları arasında ihtiyaç vardır.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
EKİM	0	21	17	0	0	0	30	0	20	0
FİLİZLENME	1	1	6	0	0	0	1	1	2	0
ÇİÇEKLENME	30	27	1	0	0	0	1	0	27	0
OLGUNLAŞMA	29	30	23	0	0	0	27	0	29	23
TOPLAM	15	22	8	0	0	0	10	1	20	3

Şekil 8.26 Bitki Su İhtiyacı Kısıntı Oranları (Ortalama Yıl)



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
EKİM	0	100	34	0	0	0	55	0	39	-3
FİLİZLENME	100	1	36	0	0	0	0	0	-1	0
ÇİÇEKLENME	15	51	-17	0	0	0	0	0	43	0
OLGUNLAŞMA	72	22	100	0	0	0	82	0	100	100
TOPLAM	60	38	19	0	0	0	17	0	34	14

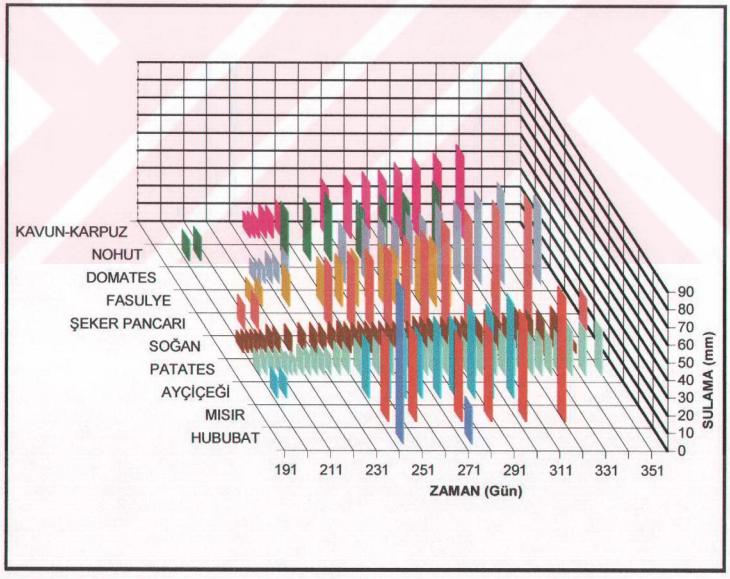
Şekil 8.27 Sulama Suyu Kısıntı Oranları (Ortalama Yıl)

Hububatı ortalama yılda 2, sulak yılda ise 3 defa yaklaşık bir ay arayla sulamak yeterli olmaktadır. Hububatta sulama aralıklarının uzun ve sulamanın bu kadar az

olmasının nedeni bitki kök derinliğinin büyük ve bitki su ihtiyacının küçük ve bitkinin su stresine daha düşük toprak suyu muhtevasında girmesidir.

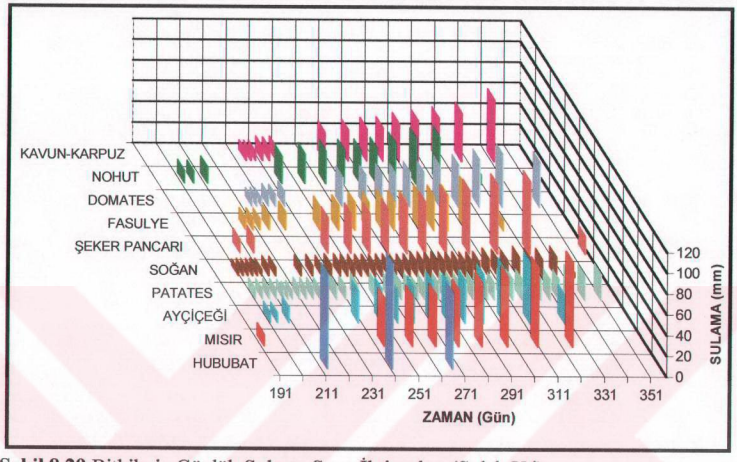
Patates ve soğan hem bitki kök derinliğinin küçük olması hem de suya hassasiyetlerinden dolayı sık sık ve çoğunlukla gün aşırı sulama suyuna gereksinim duymaktadır. Patates ve soğan dışındaki bitkiler daha seyrek aralılarla suya gereksinim duymaktadırlar.

Verilen tablo ve şekillerde sulama suyu ihtiyaçları her bir bitki için sulama yüksekliği (mm) cinsindendir. Gerekli sulama suyunu hazneden temin etmek için, bunlar hacim birimine dönüştürülmelidir. Her bir bitkinin ekim alanı farklı olduğundan, sulama yükseklikleri ekim alanı ile çarpılıp hacim cinsinden sulama suyu ihtiyaçları bulunur. Suyu hazneden bitki köküne ulaştırıncaya kadar iletim-dağıtım-uygulama kayıplarından dolayı, bir önceki aşamada bulunan su hacmi bir sulama randımanı katsayısına bölünür.

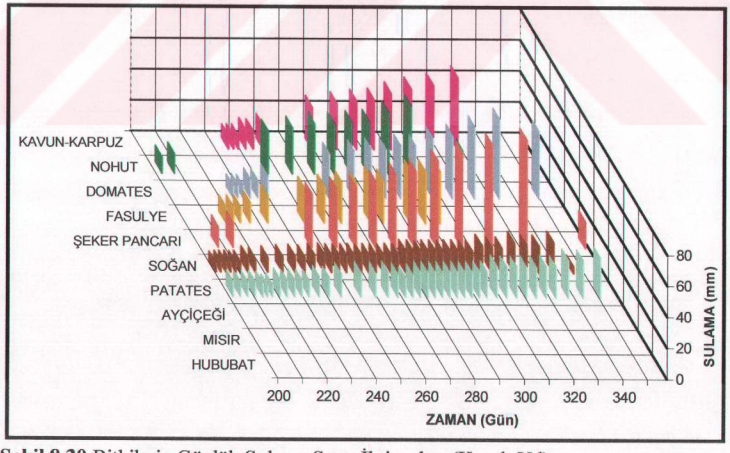


Şekil 8.28 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Ortalama Yıl)

Bulunan değer bitki için hazneden çekilecek su hacmine eşittir. Ortalama yıl için sezon boyunca hazneden çekilecek su miktarlarının aylık ve günlük programı Tablo (8.3) ve Tablo (8.4)'te verilmiştir. Her bitkinin aylık ve yıllık su ihtiyaçları veya tüm bitkiler için aylık ve yıllık su ihtiyaçları Tablo (8.3)'de verilmiştir.



Şekil 8.29 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Sulak Yıl)



Şekil 8.30 Bitkilerin Günlük Sulama Suyu İhtiyaçları (Kurak Yıl)

Tablo 8.2 Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Sulama Suyu Miktarları (Ortalama Yıl)

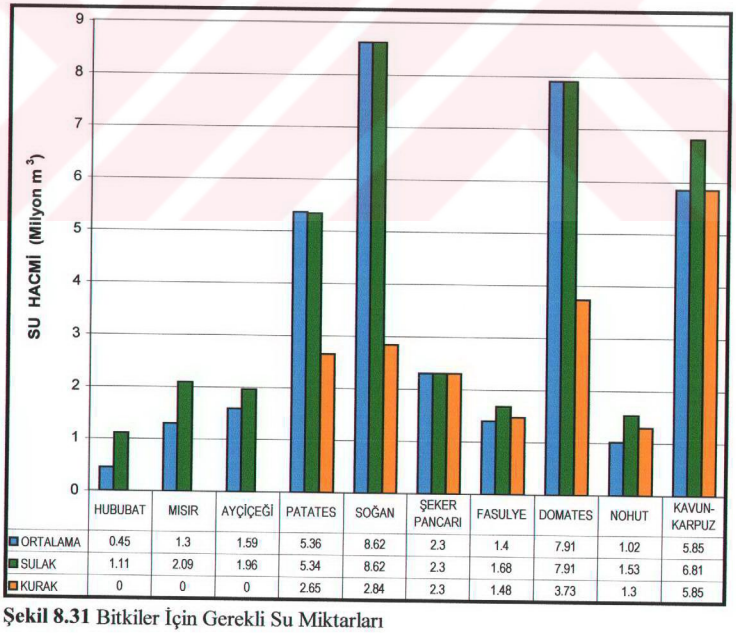
AY	GÜN	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUNKARPUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)									
NİSAN	200					6.4					
	201				10						
	202			12		7				12	
	204				9.8	6.9					
	205										
	206			12		6.9					
	207				9.9		14			14	
	208					7					
	210				9.8	7					
MAYIS	213				9.4	9.9	16				
	215				7.4						
	216					9.1					
	217				8.1			11			
	220				12						
	221					10		11			
	223				11						
	225								8.3		
	226				11						
	227					11			8.6		
	228										
	229				11				8.5		
	232				11	11			13		
	233							18			
	235								12		9.1
	236				14	11					
	237										9
	239								15		9
	240				13	12					
	242			31							13
HAZİRAN	244	87	45			12					
	245				15		35			28	12
	247					12					
	248							22			
	249										16
	250					12					
	251			31							
	253				16	12					
	255						38			30	
	256		49			12		24			
	258			37							
	259				16	12					
	262					12					
	263						39	27			
	264				16				29	33	
	265			35		12					
	268				15	12					
	269							28			28
	270										
	271				13	12	43				
	273		40								

AY	GÜN	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUNKARPUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)									
TEMMUZ	274	21			15	13			31		
	275							30			
	276		45								
	277				17	15					
	278									28	
	279						48				30
	280			41	16	14		28			
	281								32		
	283				17	14					
	285							29			
	286				17	14					
	287						50		32		32
	288			48						32	
	289		50		17	15					
	291							35			
	292				17	15					
	293								35		
	294										33
	295				17	15					
	296			47			57				
	297							34			
	298				17	15				33	
	299								34		
	301				17	15					37
	303							34			
	304		57		17	15					
AĞUSTOS	305			54							
	306						62		40		
	308				21	18					
	309										40
	311									39	
	312				20	17					
	314								41		
	316				20	17					
	318						67				42
	320				20						
	321		70			20					
	323								47		
	324				20			9.7			
	326					19					
	328				20						47
	331					18					
	332				20		71				
	333								52		
EYLÜL	337				25	21					
	343				24						
	345					5.1					
	349								44		
	350				26						
	356						18				
	360				5.4						

Sezon boyunca her gün hazneden su çekilip çekilmeyeceği, çekilecekse ne kadar su çekileceği ve çekilen suyun hangi bitkilere ne kadar verileceği Tablo (8.4)'te bir sulama programı olarak verilmiştir. Ortalama, sulak ve kurak yıllarda tüm bitkiler için bir sezon boyunca gerekli su miktarları Şekil (8.31)'de görülmektedir.

Tablo 8.3 Bitkilerin Aylık Su İhtiyaçları (milyon m^3, Ortalama Yıl)

BİTKİ	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	TOPLAM
HUBUBAT	0	0	0.36	0.09	0	0	**0.45**
MISIR	0	0	0.39	0.63	0.29	0	**1.3**
AYÇİÇEĞİ	0.1	0.13	0.59	0.56	0.22	0	**1.59**
PATATES	0.33	0.88	0.77	1.51	1.19	0.67	**5.36**
SOĞAN	0.68	1.2	1.95	2.59	1.79	0.42	**8.62**
ŞEKER PANCARI	0.06	0.07	0.64	0.64	0.82	0.07	**2.3**
FASULYE	0	0.16	0.41	0.78	0.04	0	**1.4**
DOMATES	0	1.06	0.48	2.7	2.95	0.73	**7.91**
NOHUT	0.1	0	0.37	0.38	0.16	0	**1.02**
KAVUN-KARPUZ	0	0.66	0.92	2.15	2.12	0	**5.85**
AYLIK TOPLAM	**1.26**	**4.16**	**6.87**	**12.03**	**9.58**	**1.89**	**35.78**



Şekil 8.31 Bitkiler İçin Gerekli Su Miktarları

Tablo 8.4 Bitkiler İçin Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları (Ortalama Yıl)

AY	GÜN	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUNKARPUZ	TOPLAM
	SU MİKTARLARI (milyon m³)											
NİSAN	200					0.11						0.11
	201				0.08							0.08
	202			0.05		0.11				0.05		0.21
	204				0.08	0.11						0.19
	205											
	206			0.05		0.11						0.16
	207				0.08		0.06			0.06		0.2
	208					0.11						0.11
	210				0.08	0.11						0.19
MAYIS	213				0.08	0.16	0.07					0.31
	215				0.06							0.06
	216					0.15						0.15
	217				0.07			0.04				0.11
	220				0.1							0.1
	221					0.16		0.04				0.2
	223				0.09							0.09
	225								0.14			0.14
	226				0.09							0.09
	227					0.18			0.14			0.32
	228											
	229				0.09				0.14			0.23
	232				0.09	0.18			0.21			0.48
	233							0.07				0.07
	235								0.19		0.15	0.34
	236				0.11	0.17						0.28
	237										0.15	0.15
	239								0.24		0.15	0.39
	240				0.11	0.2						0.31
	242			0.13							0.22	0.35
HAZİRAN	244	0.36	0.19			0.2						0.75
	245				0.13		0.14			0.11	0.2	0.58
	247					0.19						0.19
	248							0.09				0.09
	249										0.26	0.26
	250					0.19						0.19
	251			0.13								0.13
	253				0.13	0.19						0.32
	255						0.16			0.12		0.28
	256		0.2			0.19		0.1				0.49
	258			0.15								0.15
	259				0.13	0.19						0.32
	262					0.2						0.2
	263						0.16	0.11				0.27
	264				0.14				0.48	0.13		0.75
	265			0.14		0.2						0.34
	268				0.13	0.2						0.33
	269							0.11			0.45	0.56
	270											
	271				0.11	0.2	0.18					0.49
	273			0.17								0.17

AY	GÜN	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUNKARPUZ	TOPLAM
	SU MİKTARLARI (milyon m³)											
TEMMUZ	274	0.09			0.12	0.21				0.51		0.93
	275								0.12			0.12
	276		0.19									0.19
	277				0.14	0.24						0.38
	278										0.12	0.12
	279							0.2			0.5	0.7
	280			0.17	0.14	0.23			0.12			0.66
	281									0.53		0.53
	283				0.14	0.24						0.38
	285								0.12			0.12
	286				0.14	0.24						0.38
	287							0.21		0.53	0.52	1.26
	288			0.2							0.13	0.33
	289		0.21		0.14	0.24						0.59
	291								0.14			0.14
	292				0.14	0.24						0.38
	293									0.57		0.57
	294										0.53	0.53
	295				0.14	0.24						0.38
	296			0.19				0.23				0.42
	297								0.14			0.14
	298				0.14	0.24					0.14	0.52
	299									0.57		0.57
	301				0.14	0.24					0.6	0.98
	303								0.14			0.14
	304		0.24		0.14	0.24						0.62
AĞUSTOS	305			0.22								0.22
	306							0.26		0.65		0.91
	308				0.17	0.3						0.47
	309										0.65	0.65
	311									0.16		0.16
	312				0.17	0.28						0.45
	314									0.68		0.68
	316				0.17	0.27						0.44
	318							0.28			0.69	0.97
	320				0.17							0.17
	321		0.29			0.33						0.62
	323									0.77		0.77
	324				0.17				0.04			0.21
	326					0.31						0.31
	328				0.17						0.77	0.94
	331					0.3						0.3
	332				0.17			0.29				0.46
	333									0.85		0.85
EYLÜL	337				0.21	0.34						0.55
	343				0.2							0.2
	345					0.08						0.08
	349									0.73		0.73
	350				0.22							0.22
	356							0.07				0.07
	360				0.04							0.04

8.7 Hazne İşletme Çalışması

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda aylık haznede biriken ve çekilen su miktarları Şekil (8.32)'de görülmektedir. Ekim-Mart (1-6. aylar) arasında herhangi bir su gereksinimi bulunmamaktadır. Nisan-Eylül (7-12. aylar) arasında ise yoğun su talebi bulunmaktadır. Buna karşın, her üç durumda da haznede biriken hacmin büyük bir kısmı ilk 6 ayda gerçekleşmektedir. Böylelikle ilk 6 ayda gelen su hacmi son 6 ayda sulama suyu olarak bitkilere dağıtılmaktadır.

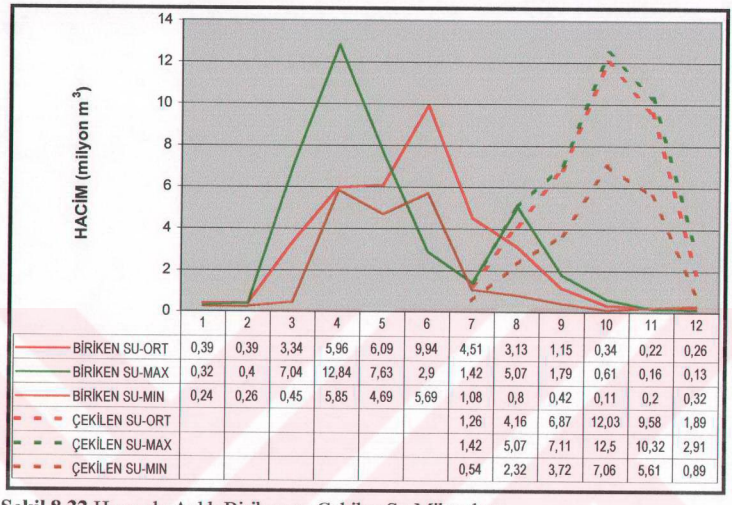
Ortalama yılda en fazla 12.03 milyon m^3 ile Temmuz ayında, en az 1.26 milyon m^3 ile Nisan ayında suya gereksinim vardır. Sulak yılda, yine Temmuz ayında 12.5 milyon m^3 en fazla su ihtiyacı olurken, 1.42 milyon m^3 ile Nisan ayı en az su ihtiyacı olan aydır. Kurak yılda ise Temmuz ayında 7.06 milyon m^3 ve Nisan ayında 0.54 milyon m^3 su ihtiyacı bulunmaktadır.

Burada özellikle sulama amaçlı biriktirme haznelerinin önemi çok açık bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, su talebinin olmadığı aylarda hazneye giren suyun büyüklüğü ve su talebinin olduğu aylarda ise hazneye giren suyun, su talebinden oldukça küçük olması hazne kapasitesinin de önemini ortaya koymaktadır. Her üç durumda hazne kapasitesinin değişimi de Şekil (8.33)'de görülmektedir.

Maksimum hazne kapasitesi 34 milyon m^3, minimum hazne kapasitesi 2.88 milyon m^3'dür. Bu çalışmada başlangıçta hazne kapasitesi minimum su kotunda olduğu kabul edilmiş ve herhangi bir yılda (Ekim-Eylül arası) gelen suyun tamamı sezonda bitkilere optimum dağıtılmıştır. Bu yüzden şekilde de görüldüğü üzere sezon başlangıç ve bitiminde hazne kapasitesi minimum hazne depolama kapasitesine eşittir. Kurak ve ortalama yıllarda hazneden su savaklanması söz konusu değilken, sulak yılda Mart-Nisan-Mayıs aylarında bir miktar su savaklanmaktadır. Özellikle bu aylarda yoğun su talebi olmadığından savaklanan suyu bitkilere vermek mümkün olmamaktadır. Ayrıca sulak yılda su kısıntısı da söz konusu değildir.

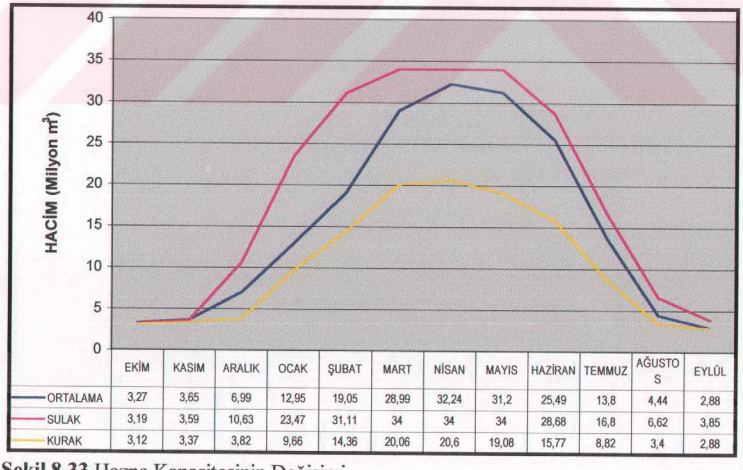
Ortalama yılda haznede *yağış+giriş akımları-buharlaşma* dan biriken hacim 35.7 milyon m^3 olup bu hacmin tamamı bitkiler tarafından kullanılmaktadır. Sulak yılda ise haznede depolanan hacim 40.3 milyon m^3 olup bu miktarın da tamamı sulama maksadı için kullanılmıştır. Sulak yılda ayrıca 11.5 milyon m^3 su savaklanmıştır.

Kurak yılda ise haznede biriken 20.11 milyon m^3 suyun tamamı bitkilere verilmiştir. Böylece, ortalama ve kurak yıllarda, yıllık haznenin akımları düzenleme oranı α_d=1 olurken, bu oran sulak yılda α_d=40.3/(40.3+11.5)=0.78 olmaktadır.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BİRİKEN SU-ORT	0,39	0,39	3,34	5,96	6,09	9,94	4,51	3,13	1,15	0,34	0,22	0,26
BİRİKEN SU-MAX	0,32	0,4	7,04	12,84	7,63	2,9	1,42	5,07	1,79	0,61	0,16	0,13
BİRİKEN SU-MIN	0,24	0,26	0,45	5,85	4,69	5,69	1,08	0,8	0,42	0,11	0,2	0,32
ÇEKİLEN SU-ORT							1,26	4,16	6,87	12,03	9,58	1,89
ÇEKİLEN SU-MAX							1,42	5,07	7,11	12,5	10,32	2,91
ÇEKİLEN SU-MIN							0,54	2,32	3,72	7,06	5,61	0,89

Şekil 8.32 Haznede Aylık Biriken ve Çekilen Su Miktarları



	EKİM	KASIM	ARALIK	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL
ORTALAMA	3,27	3,65	6,99	12,95	19,05	28,99	32,24	31,2	25,49	13,8	4,44	2,88
SULAK	3,19	3,59	10,63	23,47	31,11	34	34	34	28,68	16,8	6,62	3,85
KURAK	3,12	3,37	3,82	9,66	14,36	20,06	20,6	19,08	15,77	8,82	3,4	2,88

Şekil 8.33 Hazne Kapasitesinin Değişimi

Hazneye giriş akımları verileri aylık olduğu için hazne işletme çalışması da aylık yapılmıştır. Yukarıda ve önceki bölümlerde anlatıldığı üzere sulama sahasında su dağıtım programı günlük olarak belirlenmiştir. Günlük hazneden talep edilen su miktarları aylık değerlere dönüştürülerek aylık su temini ile karşılaştırılır. Tüm durumlarda ve aylarda optimum dağıtımla belirlenen su taleplerin tamamı hazneden karşılanmaktadır. Sulak ve kurak yıllara ait günlük bitki su ihtiyaçları ve günlük hazneden çekilecek su miktarları EK B'de tablo ve şekillerde verilmiştir.

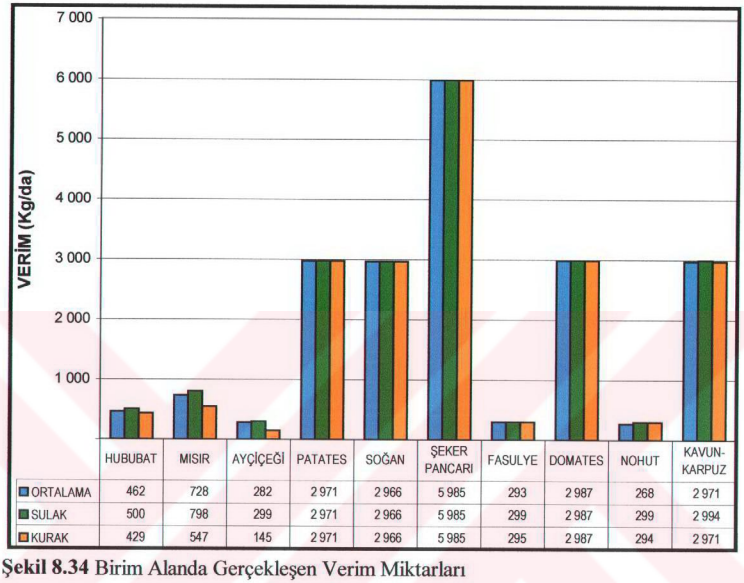
8.8 Gerçekleşen Verim ve Net Faydalar

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda birim alandan (dekardan) gerçekleşen verimler Şekil (8.34)'te verilmektedir. Hububatın sulama suyunda, ortalama yılda % 60 ve kurak yılda % 100 kısıntı olmasına rağmen verim % 8 ve 14'lük bir eksilme olmaktadır. Bunun nedeni toprak nemi ve yağışların, özellikle hububatın suya hassas olduğu zamanlarda, yeterli olmasıdır. Kurak yılda ayçiçeği için verimdeki eksilme % 52 olarak gerçekleşirken, ortalama yılda % 19 sulama suyu kısıntısına rağmen verimdeki eksilme oranı % 3 civarındadır. Hububat, mısır, ayçiçeği ve patates için gerçekleşen verim-ET ve verim-sulama ilişkileri EK B'de şekiller halinde verilmiştir.

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda tüm sulama sahasından elde edilen toplam verimler Şekil (8.35)'de verilmiştir. Burada bir bitkiden ortalama, sulak ve kurak yıllarda elde edilen verimleri birbiriyle kıyaslarken her bir durumda bitkinin ekim alanını dikkate almak gereklidir. Hububat, sulak yılda 2465 dekarlık alandan 1232 ton, kurak yılda ise 9847 dekarlık alandan 4235 ton olarak elde edilmiştir. Domates sulak yılda 9858 dekarlık alandan 29449 ton, kurak yılda 4642 dekarlık alandan 13867 ton elde edilmiştir.

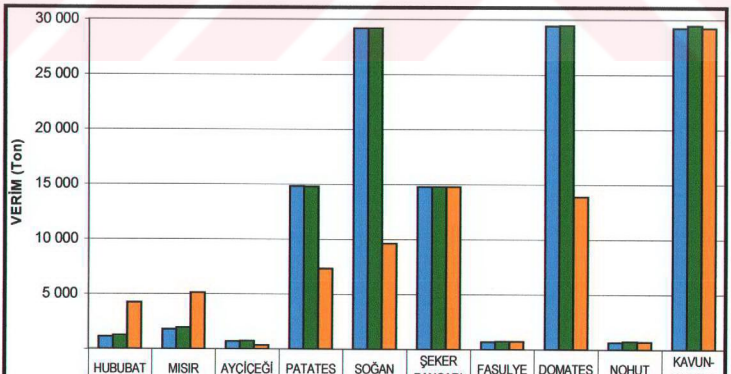
Ortalama, sulak ve kurak yıllarda tüm sulama sahasından elde edilen toplam net faydalar Şekil (8.36)'da verilmiştir. Bu çalışmada, optimum su dağıtım ve sulama programını belirlerken daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi net faydayı maksimize yapmak amaç olarak seçilmiştir. Bundan dolayı aşağıda görülen net fayda değerleri verilen durumlar (ort-max-min), şartlar ve kısıtlar altında toplamda olabilecek en büyük net fayda değerleridir. Elde edilen toplam net fayda, bu bölümün başından itibaren verilen optimum sonuçları sağlayan en büyük değerdir. Başka bir

değişle, bu şartlar altında yukarıda verilen optimum desen veya dağıtımlardan herhangi biri değiştirilirse aşağıdaki toplam net faydalardan daha küçük bir değer elde edilecektir.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
ORTALAMA	462	728	282	2 971	2 966	5 985	293	2 987	268	2 971
SULAK	500	798	299	2 971	2 966	5 985	299	2 987	299	2 994
KURAK	429	547	145	2 971	2 966	5 985	295	2 987	294	2 971

Şekil 8.34 Birim Alanda Gerçekleşen Verim Miktarları

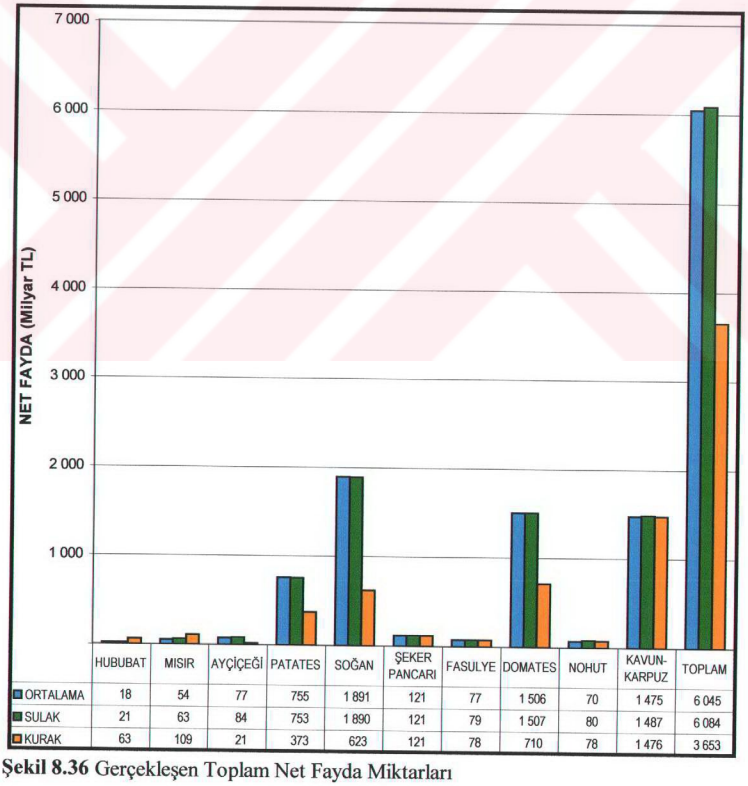


	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ
ORTALAMA	1 139	1 795	695	14 822	29 201	14 753	721	29 431	662	29 216
SULAK	1 232	1 966	737	14 766	29 186	14 753	736	29 449	737	29 463
KURAK	4 235	5 137	356	7 323	9 615	14 753	727	13 867	724	29 251

Şekil 8.35 Gerçekleşen Toplam Verim Miktarları

Ortalama, sulak ve kurak yıllarda elde edilen toplam net faydalar 1998 yılı fiyatlarıyla sırasıyla 6.045, 6.084 ve 3.653 trilyon TL (sırasıyla 22.8, 22.96, 13.8 milyon dolar) olarak elde edilmiştir. Kısıntılı sulamanın yapıldığı ortalama yılda sulama suyu hacminin sulak yıla göre % 11.4 eksik olmasına rağmen aynı bitki deseninden elde edilen toplam net faydadaki eksiklik yapılan optimum dağıtımla % 1 civarındadır.

Birim net faydası yüksek olan domates, kavun-karpuz ve soğan gibi bitkiler, birim net faydası düşük olan hububat, mısır ve ayçiçeği gibi bitkilere göre ekim alanları dört kat büyük olurken, net faydaları 20 ile 100 kat arasında büyük gerçekleşmiştir. Domates, kavun-karpuz ve soğanın net faydalarının toplamı, toplam net faydanın % 80'ini oluşturmaktadır.



	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN-KARPUZ	TOPLAM
ORTALAMA	18	54	77	755	1 891	121	77	1 506	70	1 475	6 045
SULAK	21	63	84	753	1 890	121	79	1 507	80	1 487	6 084
KURAK	63	109	21	373	623	121	78	710	78	1 476	3 653

Şekil 8.36 Gerçekleşen Toplam Net Fayda Miktarları

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada geliştirilen model, sulama amaçlı bir barajın sulama sahasına ekilen muhtelif bitkiler için su potansiyelinin yeterli ve yetersiz olması durumlarında optimum su dağıtım programını araştırmaktadır. Optimizasyonda ise net faydayı en büyük yapmak amaç olarak alınmıştır. Modelde, değişken toprak-bitki-atmosfer sürekliliği günlük takip edilerek bitkinin dinamik su tüketimi hesaplanmıştır. Geliştirilen günlük toprak su dengesi modeli yardımıyla, toprak nem değişimi ve bitki su tüketiminin seyri kontrol edilmiştir. Bitki evapotranspirasyonu en yeni ve en hassas çözüm veren FAO Penman-Monteith Metodu ile hesaplanmıştır. Bitki verimi-su tüketimi için, ET ile verim arasında ilişkiyi ifade eden ampirik bir bağıntı kullanılmıştır. Hazne giriş akımları AR(1) modeli kullanılarak stokastik olarak ele alınmıştır. Birisi suyu talep eden bitki kök bölgesindeki toprak tabakası ve diğeri suyu arz eden biriktirme haznesi olmak üzere iki farklı kontrol hacmi birbirine entegre edilerek maksimum net faydayı veren optimum sulama programı bulunmuştur.

Biriktirme haznesinde su dengesi aylık olarak hesaplanırken, kök bölgesindeki su dengesi günlük hesaplanmıştır. Hazneden sulama sahasına gelinceye kadar iletim ve dağıtım kayıpları ve suyu kök bölgesine verirken oluşan uygulama kayıplarını ifade eden bir α_k randıman katsayısı bitki dikkate alınarak hazneden çekilecek su miktarları bulunmuştur. Optimum su dağıtım programı dinamik programlama optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Yıllık hazne depolama kapasitesi 2000 parçaya bölünerek muhtelif bitkilere optimum dağıtımı yapılmıştır. Dağıtım yıllık bazda yapılmasına rağmen, bitkilerin yıllık her bir su tüketimine karşılık gelen ekimden-hasada kadar bütün parametreler (bitki evapotranspirasyonu, toprak nem durumu, dinamik sulama aralıkları ve zamanı gibi) günlük hesaplandığından, haznenin yıllık su kapasitesinin optimum dağıtımı yapılsa da, bitkilere verilecek günlük optimum su dağıtım programı bulunmuştur. Böylelikle bitkilerin sezon boyunca dinamik aralıklarda sulama suyu ihtiyaçları da dolaylı olarak belirlenmiştir.

Önceki çalışmalardan farklı olarak, kısıntı oranları tayin edilmemiş bunun yerine bitki büyüme sezonu boyunca toprak nemi ve gerçek su tüketimleri izlenerek değişik kombinezonlar için senaryolar yardımıyla gerçek optimum kısıntı oranları belirlenmiştir. Bitki verimi fonksiyonu *sulama suyunun* değil, *bitki su ihtiyacının* bir fonksiyonudur. Bundan dolayı, *sulama suyunda* yapılan kısıntı oranın *bitki su ihtiyacında* meydana getirdiği kısıntı oranı günlük takip edilerek bitki verimi hassas bir şekilde hesaplanmıştır.

Bu çalışmada bir sulama programlaması yapılmakla birlikte, dinamik bir yapı gösteren sulama sahası parametreleriyle hem dinamik hem de stokastik bir yapı gösteren hazne depolaması birbiriyle entegre edilerek ve net faydayı maksimize etmeyi amaç alarak, suyun en verimli şekilde kullanılması gibi hazır programlarda bulunmayan çok geniş kapsamlı bir konu incelenmiş ve geliştirilen bir model ile problem çözülmüştür.

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Öncelikle geliştirilen model ile ortalama, sulak ve kurak yıllar için ayrı ayrı optimum çözümler ortaya konmuştur. Dolayısıyla model verilen veya uygulanan sahada olabilecek herhangi bir su potansiyeli değişiminde optimum çözümü sağlamaktadır.

2. Mevcut su potansiyeli için bitkilerden elde edilebilecek en büyük net faydayı veren optimum bitki deseni belirlenmektedir.

3. Bitki desenine göre sahada optimum su dağıtım programı belirlenmektedir. Şimdiye kadar yapılanlardan farklı olarak, karar aralıkları bir gün seçilirken buna bağlı olarak sulama aralıkları (zamanları) ve miktarları dinamik olarak elde edilmektedir.

4. Elde edilen sulama miktarları bir dönüşüm katsayısı ile çarpılarak hazneden çekilecek su miktarları da günlük hesap edilmiştir. Başka bir değişle, hazneden ne zaman ve ne kadar suyun bırakılacağı kararı aynı zamanda bitkilere ne zaman ve ne kadar su verileceği kararı olmaktadır. Hazne işletme politikasını sahada yapılan sulama programlaması belirlenmektedir.

5. Hangi bitkilerin hangi büyüme evresinde ne kadar sulama suyu kısıntısı ve bitki su ihtiyacı kısıntısı olacağı model tarafından belirlenmektedir.

6. Daha önce geliştirilen yöntemlerdeki gibi sulama suyu kısıntı oranını tayin etmeğe ve sabit olarak almaya gerek yoktur. Model net faydayı en büyük yapacak optimum kısıntı oranlarını dinamik olarak hesaplamaktadır. Her bir bitkinin mevcut her hangi bir su potansiyeli durumuna karşılık bir sezon boyunca bitkinin optimum kısıntı oranları 4 büyüme evresinde aranmıştır. Solma noktasının altına düşmemek kaydıyla bitkinin tüm büyüme evrelerinde olabilecek kısıntı oranları tek tek denenmiştir. Sadece bir bitki için 1 336 336 adet senaryo izlenerek net faydayı en yüksek yapan kısıntı değerleri bulunmuştur.

7. Bitki su stres noktasının ($\theta_s(p_b)$) değişimi bitki su hassasiyetine (p_b) bağlı olarak ifade edilmiştir.

8. Bu modelde, sulama miktarları ve zamanları ile birlikte bitki gerçek evapotranspirasyonu, bitki katsayıları, toprak nem muhtevası, bitki su stres noktası, bitki verimi ve net faydası hesaplanmaktadır.

9. Kök bölgesindeki toprak nemi günlük izlendiğinden, yeterli su potansiyeli durumunda bitki su stresine girmesine izin verilmemektedir ve gerektiğinde sulama yapılmaktadır. Yetersiz su potansiyeli durumunda ise bitkinin su stresine girmesine kontrollü olarak ve yetersizlik oranında izin verilir. Toprak neminin en kurak dönemlerde bile solma noktasının altına inmesine izin verilmez.

10. Su potansiyelinin kısmen yetersiz olduğu durumlarında yapılan optimizasyonla verim ve net faydadan az bir kayıpla tüm saha sulanabilmektedir.

11. Kurak sezonlarda ise net faydası düşük ve gelen yağışlardan önemli ölçüde faydalanan bitkilerde kuru tarım yapılarak diğer tüm bitkilerde ya tam sulama veya kısmen eksik sulama yapılmaktadır.

12. Kısıntılı sulamanın yapıldığı ortalama yılda sulama suyu hacminin sulak yıla göre % 11.4 eksik olmasına rağmen aynı bitki deseninden elde edilen toplam

net faydadaki eksiklik yapılan optimum dağıtımla % 1 civarındadır. Sulak ve ortalama yılda aynı bitki desenin olması ve net faydası en yüksek bitkinin en küçüğe oranı yaklaşık 20 iken sulama suyu ihtiyacında bu oran sadece 2 olmasının da buna katkısı vardır.

13. Kurak yılda, sulak yıla göre su potansiyelinde % 50 azalma olduğundan, sulama suyu ihtiyacı ve net faydası düşük olan bitkilerin oranı bitki deseninde artırılmaktadır. Bunun sonucunda ise toplam net faydada % 40 bir azalma olmaktadır.

14. Sulak yılda su potansiyeli yeterli olduğundan herhangi bir kısıntıya gerek yoktur. Sulama programı, tam sulamaya göre belirlenen bitki deseni için su stresine girmeyecek şekilde sulama yapılmasını sağlamaktadır.

15. Sonuç olarak herhangi bir su potansiyeli için, model optimum çözümü vermektedir. Ortalama yılda yapılan su kısıntısından toplam net fayda kısıntı oranına göre çok az oranda etkilenmektedir. Kurak yılda ise % 50 sulama suyu kısıntısına karşılık toplam net faydada % 40 azalma olmaktadır. Sulak yılda ise herhangi bir kısıtlama yapılmasına gerek yoktur.

KAYNAKLAR

Akkaya C. and Tanrıverdi, M., 1993. Limited irrigation and management research on irrigation reservoirs, USBR Engineering and Research Service, Denver, Colorado.

Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L. and Burman, R. D., 1989. Operational estimates of evapotranspiration, *Agron. J.*, **81**, 650-662.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration, *FAO Irrigation and Drainage Paper,* **56**, Rome, Italy.

Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S. and Perrier, A., 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration, *ICID Bulletin*, **43 (2)**, 35-92.

Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A. and Pereira, L. S., 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration, *ICID Bulletin*, **43(2),** 1-34.

Amatya, D., Skaggs, R. W. and Gregory, J. D., 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.,* **121(6),** 427-435.

Bayazıt, M., 1994. Su Kaynakları Sistemleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Bayazıt, M., 1996. İnşaat Mühendisliğnde Olasılık Yöntemleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Bayazıt, M., 1997. Biriktirme Haznelerinin Tasarımı ve İşletilmesi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Bayazıt, M., 1998. Hidrolojik Modeller, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Bertsekas, D.P., 1995. Dynamic Programming and Optimal Control, Athena Scientific, Belmont, Massachusetts.

Blaney, H. F. and Criddle, W. D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, *USDA Soil Conserv. Service,* **SCS-TP-96**, Washington, D.C.

Blaney, H. F. and Criddle, W. D., 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements, *USDA-ARS Technical Bulletin*, **1275**, Washington, D.C.

Blume, H. R., Kuder, L. J., Jantz, D. R. and Shaw, A. D., 1988. Methods in determining crop water usage, *Planning Now for Irrigation and Drainage in the 21st Century,* New York, July 18-21, 368-375.

Boonyartharokul, W., 1979. Irrigation scheduling soil moisture stress model, *PhD Thesis,* Colorado State University, Fort Collins, CO.

Burman, R. and Pochop, L. O., 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data, *Development in Atmospheric Science,* **22**, Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands.

Butcher, W.S., 1971. Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation, *Water Res. Bull.*, **7(1)**, 115-123.

Chang, Y. Y. and Çorapçıoğlu M. Y., 1997. Effects of roots on water flow in unsaturated soils, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.*, **123(3),** 202-209.

Dariane, A. B. and Hughes, T. C., 1991. Application of crop yield functions in reservoir operation, *Water Res. Bull.*, **27(4)**, 649-656.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H., 1979. Yield response to water, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, **33**, Rome, Italy.

Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper,* **24**, Rome, Italy.

DSİ, 1969. Örencik projesi planlama raporu, Ankara.

DSİ, 1977. Örencik projesi planlama revizyon raporu, Ankara.

DSİ, 1988. Çavdarhisar sulaması izleme ve değerlendirme raporu, Kütahya.

Dudley N. J., 1972. Irrigation planning 4: Optimal intraseasonal water allocation, *Water Resources Research*, **8(3)**, 586-594.

Dudley N. J., Musgrave, W. F. and Howell, D. T., 1971a. Optimal intraseasonal irrigation water allocation, *Water Resources Research*, **7(4),** 770-788.

Dudley N. J., Musgrave, W. F. and Howell, D. T., 1971b. Irrigation planning 2: Choosing optimal acreages within a season, *Water Resources Research*, **7(5),** 1051-1063.

Dudley N. J., Musgrave, W. F., and Howell, D. T., 1972. Irrigation planning 3: The best size of irrigation area for a reservoir, *Water Resources Research*, **8(1),** 7-17.

Dudley, N. J. and Burt O. R., 1973. Stochastic reservoir management and system design for irrigation, *Water Resources Research*, **9(3),** 507-522.

Erkek, C., 1983. Sulama-Kurutma, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Erkut, H., 1992. Yönetimde Simülasyon Yaklaşımı, İrfan Yayınevi, İstanbul.

Hatfield, J. L. and Allen, R. G., 1996. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.,* **122(5)**, 301-308.

Hernandez-Suarez, M., 1988. Modeling irrigation scheduling and its components, and optimization of water delivery schedules with dynamic programming and stochastic ET_0 data, *PhD Thesis,* University of California, Davis, CA.

Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices*, **70**, New York.

Karabörk, M. Ç. ve Kahya, E., 1999. Sakarya havzasındaki aylık akımların çok değişkenli stokastik modellemesi, *TR. J. of Engineering and Environmental Science,* **23**, 133-147.

Karamouz, M. and Houck, M. H., 1982. Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization, *Water Resources Research,* **18(5),** 1337-1344.

Kırda, C. and Kanber, R., 1999. Water , no longer a plentiful resources, should be used sparingly in irrigated agriculture, in *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*, pp. 1-19, Eds. Kırda, C., Moutonnet, M., Hera, C. and Nielsen, D.R., Kluwer Academic Publishers, Dordercht, The Netherlands.

Kodal, S., 1996. Ankara-Beypazarı ekolojisinde yeterli ve kısıntılı su koşullarında sulama programlaması işletme optimizasyonu ve optimum su dağıtımı, *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayını*, **1465**, Ankara.

Mujumdar, P. P. and Ramesh, T. S. V., 1997, Real-time reservoir operation for irrigation, *Water Resources Research*, **33(5),** 1157-1164.

Nemhauser, G. L., 1966. Introduction to Dynamic Programming, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Neumann, P. M., 1982. Plant-water relationships, in *CRC Handbook of Irrigation Technology*, pp. 49-60, Ed. Finkel, H.J, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Prajamwong, S., Merkley, G. P. and Allen, R. G., 1997. Decision support model for irrigation water management, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.*, **123(2),** 106-113.

Ravina, I., 1982. Soil-water relationships, in *CRC Handbook of Irrigation Technology*, pp. 11-47, Ed. Finkel, H.J, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Smith, M., 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management, *FAO Irrigation and Drainage Paper,* **46**, Rome, Italy.

Steduto, P., Caliandro, A. P., Mechlia, N. B., Masmoudi, M., Martinez-Cob, A., Faci, M. J., Gana, G., Mastrorilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kırda, C., El-Quosy, D., El-Askari, K., Ali, M. A., Zareb, D. and Synder, R. L., 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean region, *The International Conference for Evapotranspiration and Irrigation Scheduling,* San Antonio, Texas, November 3-6, 457-364.

Stewart, J. I. and Hagan, R. M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.,* **99(4),** 421-439.

Stewart, J. I., Hagan, R. M. and Pruitt, W. O., 1974. Functions to predict optimal irrigation program, *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.,* **100(2),** 179-199.

Thein, S. J., 1985. The soil as a water reservoir, in *Crop-Water Relations*, pp. 45-126, Eds. Teare, I. D. and Peet, M. M., John Wiley and Sons, New York.

TOPRAKSU, 1982. Türkiye'de sulanan bitkilerin su tüketimleri rehberi, Ankara.

Vaux, H. J. and Pruitt, W. O., 1983. Crop water production functions, in *Advances in Irrigation II,* pp. 61-97, Ed. Hillel, D., Academic Press, New York.

Vedula S. and Mujumdar, P. P., 1992. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops, *Water Resources Research,* **28(1),** 1-9.

Wright, J. L., 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *ASCE J. of Irrigation and Drainage Eng.*, **108(2),** 57-74.

Wurb, R.A., 1996. Modeling and Analysis of Reservoir System Operations, Printice-Hall, Inc., New York.

Yakowitzh, S., 1982. Dynamic programing applications in water resources, *Water Resources Research*, **18(4),** 673-696.

Yeh, W. W-G., 1985. Reservoir management and operations models: A state-of-the art review, *Water Resources Research*, **21(12),** 1797-1818.

EKLER

EK A Data Dosyaları

Tablo A.1 Bitki Verileri Data Dosyası (CROPDATA.DAT)

```
49300  0.60   (TOPLAM EKİM ALANI,EP=İLETİMxDAĞITIMxUYGULAMA(0.9x0.9x0.75)
 0.30 0.17  22.0  8.0  1.0                QFC,QWP,TEW,REW,FW
 10                                       (BİTKİ SAYISI)
CCCC
```

Tablo A.1 Bitki Verileri Dosyası (CROPDATA.DAT) (devamı)

```
'FASULYE'
 5   1    120  0.4  0.7  0.45
 0.40 0.0  1.15 0.35
 0.15 0.0  1.1  0.25
 20  35   40   25
 300 182315 70000 5000  5    20
 0.2  1.1  0.75  0.2  1.15
'DOMATES'
 5   11   140  0.6  1.0  0.40
 0.60 0.0  1.15 0.70
 0.15 0.0  1.1  0.70
 30  35   45   30
 3000 77451 25667 500  5    20
 0.4  1.1  0.8  0.4  1.05
'NOHUT'
 4   16   138  0.4  0.7  0.50
 0.40 0.0  1.0  0.35
 0.15 0.0  0.95 0.25
 30  40   45   23
 300 140248 26947 5000  5    20
 0.2  0.9  0.7  0.2  1.15
'KAVUN-KARPUZ'
 5   21   127  0.4  1.0  0.40
 0.40 0.0  1.0  0.75
 0.15 0.0  1.0  0.70
 25  40   40   22
 3000 60000 9000  500  5    20
 0.6  0.8  0.8  0.3  1.1
```

Tablo A.2 Meteoroloji Verileri Dosyası (METEDATA.DAT)

39.77 ENLEM(39.46)
30.52 BOYLAM(30.31)
781 HKOT
C
İSTASYON ADI: KÜTAHYA
İSTASYON NO: 17725
C

AYLIK MİNİMUM SICAKLIKLAR (0C)

20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	-14.8	-7	-12	-2.4	0	4.6	9.2	10	2.5	0	-7.8	-7.4
1981	-10.6	-12.7	-6.4	-6.4	-2.8	5.2	8.6	4.6	3.4	3.9	-7.8	-2.3
1982	-20	-12.5	-9.8	-1.6	2	5.5	5.5	7.4	3.8	-2.7	-8.4	-10.8
1983	-15.4	-14.6	-9.6	-2.4	1.5	5	8.5	7.4	2.5	-1.8	-8.1	-5.8
1984	-7.5	-6	-5.2	-4	3.6	4.8	7.4	6.6	2.8	-4.4	-5.1	-13.8
1985	-11.8	-21.5	-15.7	0	-0.9	6.8	4	9	2.7	-5.2	-1.2	-7.6
1986	-9.5	-9.2	-12.4	0	-1	6.4	7.8	10	5	-1.5	-7.1	-9.7
1987	-16	-10.2	-13	-3.7	0.5	6	8.8	7.1	2	-2.9	-3.7	-13.8
1988	-9.2	-11.7	-6.5	0.5	0.8	6.5	10.3	6.8	3.8	0.1	-9.6	-9
1989	-13.7	-10.2	-4.2	2.4	0.6	7.4	11.7	10.1	3.9	-0.3	-8.7	-14.4
1990	-13	-8.1	-6.6	-2.9	-0.3	4.4	9	8.6	3	-2.1	-4	-8.2
1991	-16.2	-18.6	-9.1	-0.9	1.9	5.2	10.6	9.9	5.8	-5	-3.2	-12.5
1992	-13.4	-17.2	-7.2	-1.4	1.3	7	7.7	10	0.4	1.2	-7	-12.3
1993	-13.6	-11.4	-6.2	-2.6	4	7.3	6.5	10.4	0.6	-1.6	-7.2	-10
1994	-6.5	-13.4	-6	-2.1	1.2	5.8	9	10.5	6.7	2.5	-7	-13.2
1995	-10.5	-7.4	-6.4	-5.1	0	8	10.4	8.2	4.8	-0.3	-11	-7.8
1996	-11	-9.5	-7	-3	7.1	5.4	10	9.5	2.1	-2.8	-4.5	-4.9
1997	-8.4	-18.4	-11.2	-7	3	4	8.6	7.8	1.5	0.5	-4.4	-8
1998	-13.4	-9.4	-9.3	-2.2	3.8	7.2	7	10.5	5	1.9	-3.6	-5.3
1999	-7.6	-9	-5.3	-0.4	1	7.2	10.8	6.8	5.3	-0.3	-8.4	-5.8

C

AYLIK MAKSİMUM SICAKLIKLAR (0C)

20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	11.2	12.4	22	22.4	32.4	34.3	38.2	33.2	31	30	22.2	16
1981	10.5	12.7	24.2	23.6	28	32.6	36.9	30.8	32.4	27	17.4	13
1982	15.8	13.4	19.2	24.4	29	34.8	31.2	33	32	26.6	19.8	15.4
1983	9.8	17.2	23	26.2	26.6	31.2	32.4	32.6	31.8	25.2	21	13.4
1984	10.4	13.6	20	23.4	29.4	32.4	34.4	29.6	33.4	31	17.5	9
1985	13.4	15	19	27.8	28.8	31.8	34.4	36.2	31.6	28	23.9	17.2
1986	12.8	15.3	22.8	27	26.8	29.3	36.4	37	34.1	22.9	16.6	13.1
1987	13.8	17.1	21	20.7	31.2	32.2	37	35.2	32	28.2	19.2	13.5
1988	13.5	13.6	18.3	23.5	29.6	30.7	34	34.2	31.2	25	14.2	14
1989	9	18.8	21.2	29	31	31.6	34	33.7	32.2	25	21	15.7
1990	9.3	16	20.2	24.2	32.5	32.9	33.8	31.9	30.4	27.2	22.8	14.1
1991	11.2	11.3	25	24.5	26	34.1	34.8	34.1	31.5	30.6	18.2	8.8
1992	6.1	10	19.5	24.3	26	30.3	33.2	33.4	32.1	30.3	21.9	12.1
1993	10.8	11.2	20.2	25.2	30	32.2	35.2	34.4	32.3	30	25	13
1994	13.7	15.6	20.8	26.6	31.3	31.9	33	35.8	34.6	30.1	22.4	13.4
1995	15.2	18.2	19.2	22.3	31.6	31.4	31.4	32.1	31.6	23.2	17.1	14.3
1996	11.4	16.2	16.6	23.8	28.8	34.8	37.6	32.2	29	25.3	21.7	15.5
1997	15.4	15.8	16.5	24.3	29.6	32.4	34.1	30.8	29	26	20.8	12.7

Tablo A.2 Meteoroloji Verileri Dosyası (METEDATA.DAT) (devamı)

1998	11.6	17.1	19	30	26.2	30.8	35.2	35.3	30.2	29.5	22.2	13.4
1999	14.1	13.2	19.1	25.3	30.4	30.6	35.8	36.6	32.1	30.9	19.1	14.4
C												
					AYLIK MİNİMUM NEM (%)							
20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	44	39	20	17	17	7	16	18	14	17	25	29
1981	48	35	15	13	15	7	6	19	11	23	16	36
1982	26	21	12	12	5	15	16	13	16	19	12	27
1983	44	26	20	16	13	17	19	14	15	18	28	48
1984	61	46	24	19	20	13	20	23	20	18	39	34
1985	32	32	26	16	18	17	20	16	18	18	24	39
1986	30	33	16	17	18	17	16	12	17	17	28	22
1987	27	27	27	19	16	21	19	16	16	23	31	36
1988	36	33	18	23	17	23	16	17	12	22	29	36
1989	35	23	20	15	8	19	18	14	13	19	17	37
1990	29	27	15	19	20	19	20	16	20	12	25	23
1991	36	29	20	15	20	14	16	22	16	16	25	31
1992	31	24	23	16	17	20	19	18	12	14	27	36
1993	28	36	18	15	25	23	20	15	19	15	20	31
1994	35	27	24	15	21	15	24	20	18	23	29	38
1995	32	20	22	25	19	23	20	22	20	20	28	38
1996	41	29	31	20	22	17	20	18	22	33	26	45
1997	32	32	26	31	25	27	30	35	33	26	34	34
1998	48	34	29	33	33	33	30	33	32	28	38	49
1999	37	40	26	25	28	27	25	23	26	28	24	32
C												
					AYLIK MAKSİMUM NEM (%)							
20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	93	92	94	95	95	92	91	86	98	95	94	91
1981	93	98	92	92	88	90	90	93	95	97	94	97
1982	95	95	94	92	93	90	94	90	94	95	93	96
1983	95	93	92	95	94	95	90	89	90	94	92	90
1984	93	90	90	92	89	89	91	90	87	91	100	100
1985	89	86	97	94	93	94	86	93	91	92	95	96
1986	93	90	92	94	91	82	75	75	79	79	83	95
1987	94	97	98	100	87	90	84	84	85	94	94	93
1988	93	96	90	92	88	88	80	78	91	94	93	91
1989	89	86	92	82	86	83	84	84	91	95	89	92
1990	93	94	89	98	99	97	93	98	94	96	92	89
1991	89	95	96	98	99	95	93	86	95	97	96	92
1992	93	89	93	98	90	91	94	83	85	94	96	97
1993	94	92	90	97	98	94	96	91	93	98	97	97
1994	97	96	95	97	92	94	96	93	95	99	100	99
1995	90	94	95	93	95	95	95	95	96	97	95	98
1996	96	93	94	94	94	91	98	96	97	98	100	92
1997	93	91	97	93	90	94	87	97	100	98	97	97
1998	98	97	97	99	99	99	87	98	97	96	97	97
1999	97	95	94	92	88	91	90	93	91	95	95	95
C												

Tablo A.2 Meteoroloji Verileri Dosyası (METEDATA.DAT) (devamı)

AYLIK ORTALAMA RÜZGAR HIZI (m/sn)												
19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1981	2	1.7	1.7	1.6	1.7	1.3	1.6	1.4	1.2	1.2	1.6	2.7
1982	1.5	1.4	2	2	1.6	1.4	1.5	1.3	1.2	1.1	1.3	1.8
1983	1.6	2	1.8	1.9	1.4	1.4	1.5	1.3	0.9	1.1	1.3	1.2
1984	1.3	1	1.8	1.5	1.4	1.4	1.7	1.5	1.4	1.4	1.5	1.3
1985	2.2	2.4	1.8	2.6	1.7	1.9	1.9	1.7	1.4	1.6	1.6	1.4
1986	2.3	2.2	1.5	1.8	2	1.7	1.8	1.4	1.4	1.6	1.5	1.9
1987	2.4	1.6	2.1	2.4	1.9	1.7	1.7	1.9	1.4	1.5	1.5	1.7
1988	1.6	2	2.2	1.7	1.5	1.7	1.9	1.6	1.5	1.7	2.1	1.8
1989	1.4	1.6	1.7	2.1	1.9	1.8	2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.7
1990	1.4	2	1.6	2	1.9	1.8	1.8	1.6	1.3	1.6	1.7	1.5
1991	1.3	1.8	1.6	2.3	2.3	1.5	1.6	1.7	1.5	1.3	1.3	1.8
1992	1.5	1.8	2	1.9	1.9	1.7	1.7	1.5	1.5	1.9	1.6	1.6
1993	1.4	2.4	1.9	2.2	1.5	1.8	1.8	1.6	1.7	1.1	1.5	1.5
1994	1.4	1.5	2	2.1	1.5	2	2	1.5	1.2	1.1	1.7	1.7
1995	2.2	1.8	2.2	1.8	2	1.7	1.9	1.8	1.6	1.4	1.6	2.3
1996	1.6	2.2	1.9	1.8	1.6	2	1.7	1.7	1.7	1.4	1.3	2
1997	1.3	1.6	2	2.4	1.7	1.5	1.6	1.5	1.2	1.5	1	1.8
1998	1.3	1.7	2.2	1.8	1.7	1.5	1.7	1.6	1.4	1.3	1.3	1.7
1999	1.6	2	1.5	1.7	1.7	1.9	1.5	1.1	0.9	1	1.4	1.4
C												
AYLIK ORTALAMA GÜNEŞLEME SÜRSESİ (SAAT)												
19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1981	1.4	2.7	4.5	7.5	7.2	9.8	9	9.5	8.3	6.1	3.4	2.1
1982	2.5	2.6	4.1	4.9	7	10.1	9.2	8.7	8.3	6	3.9	2.3
1983	1.8	2.4	4.5	6.2	7.3	7.5	9.1	9.5	7.8	4.9	2.3	1.6
1984	2.1	2.5	2.7	4.1	8	8.7	9	9	9.2	6.6	2.7	2.3
1985	1.8	3.5	4.4	5.8	7.2	10.8	11.2	11	8.8	4.6	2.8	2.1
1986	2.1	2.7	5.3	8.8	8.2	8.8	11	10.6	6.8	5.2	3.3	2.6
1987	1.7	3	4.5	4.6	7.6	10.5	10.5	9.6	9	4.6	3.3	1.5
1988	2.1	3.9	4.8	5.3	6.5	8.6	10	10.5	9	4.4	3.3	2.2
1989	2.8	4.7	5.5	7.7	6.8	9.1	9.6	10	8	4.2	2.5	1.9
1990	2.6	3.7	7.2	5.8	7.4	9.5	9.9	10.1	7.9	5.7	3.8	2.3
1991	1.5	2.6	4.8	5.4	6.1	9.1	9.3	9.3	7	4	2.6	1
1992	1.7	3.2	4.2	6.8	7.5	7.6	8.1	10.5	8.4	5.8	3.4	1.4
1993	1.8	2.6	5.6	5.8	5.8	9.5	11	9.6	8.7	6.7	2.6	2.6
1994	2.6	2.9	4.9	7.4	8.7	10.2	9.8	9.9	8.8	5	3.1	1.3
1995	2.2	5.1	4.4	6	8.8	9.6	9.1	9.9	7.5	5.8	3.1	1.7
1996	1.7	2.9	2.8	5.4	7.9	10.2	9.7	10	6.7	3.6	4.6	1.5
1997	3.4	3.6	5	4.1	7.9	8.4	9.6	6.7	8.3	5	3.7	2.7
1998	2.6	5	3.3	6.5	5.2	8.8	11.1	10.6	7.1	5.6	3.5	1.4
1999	2.3	3.5	4.7	7.1	9	8	10.1	8.4	6.9	4.6	3.9	2.5
C												
AYLIK TOPLAM YAĞIŞ (mm)												
14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1985	151.3	78.5	59.7	35	32.8	18.8	0	7.8	1.8	22.4	70.8	42.4
1986	96.3	97.2	10.4	32.5	33.3	36.3	3	4.8	29.4	21.7	11.7	168.8
1987	142.7	30.5	57.9	68	47.7	34.1	14.7	22.6	0.5	24.2	60.4	61.1
1988	16.1	70.6	53.1	62.5	64.6	47.2	8.8	20.4	6.9	79.5	84.9	56.6

Tablo A.2 Meteoroloji Verileri Dosyası (METEDATA.DAT) (devamı)

1989	14.6	15	20.4	2.9	48.6	12.5	33	2.8	0.2	78.6	83.6	72.5
1990	11.6	31.1	24.2	66.9	22.8	37.3	11.3	22.6	33.6	48.1	36	119
1991	57.9	52.8	26.2	51.6	87.3	27.3	28.6	31.9	2.2	29.2	39.3	81.4
1992	5.2	12.7	71.1	70.9	12.9	68.9	57.3	14.8	14	48	42.6	34.5
1993	49.9	87.2	29.6	25.9	60.8	13.6	3.9	12.9	5.1	6.8	85.2	66.8
1994	42.3	44.9	54.6	39.6	25.6	13.4	16	23.8	0.9	69.9	56.7	56.9
1995	69.7	9.6	83.3	60.8	29.3	27.7	33.3	9.6	20.6	55	63.7	69.9
1996	58.9	57.2	83.4	41.8	35	6.6	36.5	1.9	48.7	32.5	21.7	96.7
1997	35.3	20	24.7	96.4	50.9	54.8	12.7	79	16.3	104.5	23.6	85.5
1998	36.2	50.6	80.2	58.6	115.6	77.1	2	20	16.3	41.5	62.9	79.7

Tablo A.3 Hidroloji Verileri Dosyası (HYDRDATA.DAT)

1034.5	1062	Min. - Max. Su Kotu
C		
41	NY	Veri Sayısı
KOT (m)	ALAN (10^6 m2)	HACİM (10^6 m3)
1025	0	0
1026	0.046	0.138
1027	0.092	0.275
1028	0.138	0.475
1029	0.184	0.675
1030	0.23	0.988
1031	0.276	1.300
1032	0.322	1.713
1033	0.368	2.125
1034	0.414	2.625
1035	0.46	3.125
1036	0.5104	3.700
1037	0.5608	4.275
1038	0.6112	4.888
1039	0.6616	5.500
1040	0.712	6.188
1041	0.7624	6.875
1042	0.8128	7.638
1043	0.8632	8.400
1044	0.9136	9.238
1045	0.964	10.075
1046	10.144	11.038
1047	10.648	12.000
1048	11.152	13.108
1049	11.656	14.217
1050	12.160	15.325
1051	12.568	16.563
1052	12.976	17.800
1053	13.384	19.200
1054	13.792	20.600
1055	14.200	22.000
1056	14.780	23.590
1057	15.360	25.180
1058	15.940	26.787
1059	16.520	28.393
1060	17.100	30.000
1061	18.880	32.000
1062	20.660	34.000
1063	22.440	36.120
1064	24.220	38.240
1065	26.000	40.360
C		

Tablo A.3 Hidroloji Verileri Dosyası (HYDRDATA.DAT) (devamı)

18 N2YEAR

ÇAVDAR HİSAR BARAJI

RESERVUAR BUHARLAŞMA MİKTARLARI 10^6 M3

AYLAR

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EKİM	KASIM	ARALIK	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AGUSTOS	EYLÜL
0.01	0	0	0	0	0	0	0.03	0.15	0.2	0.19	0.09
0.02	0	0	0	0	0	0	0.03	0.14	0.17	0.16	0.07
0.02	0	0	0	0	0	0	0.03	0.13	0.18	0.14	0.06
0.02	0	0	0	0	0	0	0.03	0.14	0.18	0.16	0.07
0.02	0	0	0	0	0	0	0.03	0.14	0.17	0.16	0.07
0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0.19	0.27	0.26	0.13
0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0.16	0.23	0.21	0.12
0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0.16	0.23	0.21	0.12
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.17	0.2	0.15	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.1	0.16	0.19	0.15	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.17	0.2	0.15	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.17	0.2	0.16	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.17	0.2	0.16	0.07
0.01	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.17	0.2	0.15	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.03	0.09	0.14	0.18	0.14	0.05
0	0	0	0	0	0	0.03	0.08	0.13	0.15	0.1	0.03
0	0	0	0	0	0	0.04	0.11	0.16	0.19	0.15	0.06
0.01	0	0	0	0	0	0.03	0.11	0.17	0.2	0.16	0.07

C

18 NYEAR

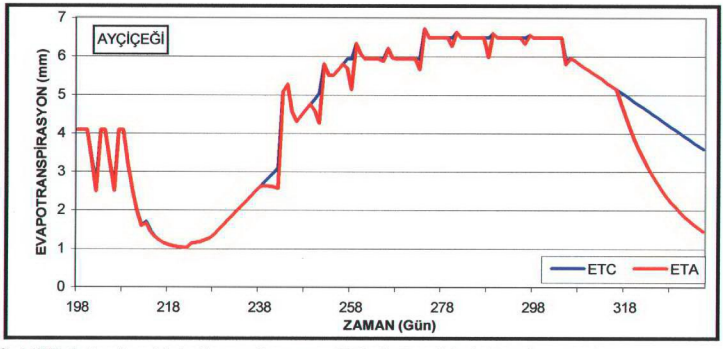
ÇAVDAR HİSAR BARAJI

RESERVUAR GİRİŞ AKIMLARI 10^6 M3

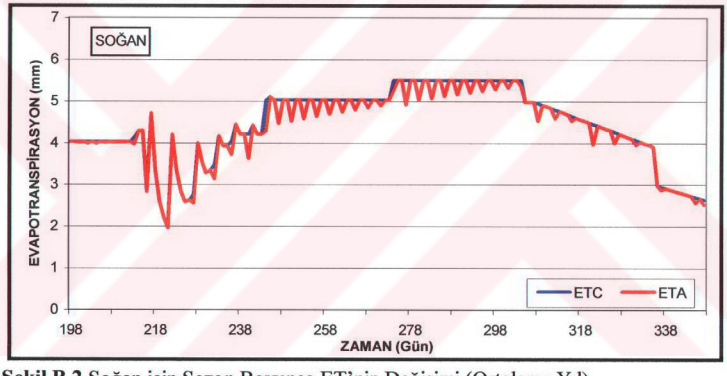
AYLAR

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EKİM	KASIM	ARALIK	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AGUSTOS	EYLÜL
0.14	0.16	0.23	2.35	2.89	9.66	4.8	1.72	0.62	0.18	0.15	0.15
0.18	0.16	0.19	4.13	1.5	4.77	0.88	0.7	0.69	0.2	0.16	0.15
0.16	0.16	0.16	2.91	2.54	3.39	3.69	2.71	1.43	0.2	0.16	0.16
0.16	0.18	4.26	3.35	6.19	2.68	1.59	0.99	1.17	0.18	0.15	0.13
0.14	0.15	0.18	0.18	4.36	7.99	3.44	1.15	0.22	0.15	0.12	0.13
0.18	0.16	5.69	14.17	15.26	12.83	5.84	9.2	5.05	1.03	0.21	0.21
0.3	0.3	1.37	0.92	2.7	11.82	0.71	0.71	0.95	0.07	0.05	0.11
0.18	0.18	4.14	2.77	7.85	12.29	14.04	10	3.24	1.83	0.35	0.34
1.02	1.7	7.31	25.8	6.01	15	6.1	2.38	0.98	0.44	0.39	0.61
0.27	0.41	4.19	10	3.28	5.32	3.43	1.69	0.48	0.16	1.09	0.23
0.19	0.19	2.37	14.7	13.7	15.4	2.76	1.92	1	0.19	0.2	0.51
1.67	0.12	3.56	10.1	11.8	5.79	5.1	3.51	1.26	0.67	0.5	1.34
0.22	0.33	5.36	8.35	17.2	9.96	6.42	3.03	1.75	1.14	1.08	1.1
1.39	1.58	2.69	3.14	3.76	10.1	3.2	1.9	1.13	0.59	0.5	0.57
0.63	0.96	4.66	1.34	4.77	3.06	1.58	1.4	1.02	0.98	0.41	0.43
1.25	0.82	0.68	0.63	4.69	5.64	2.42	1.09	0.47	0.19	0.18	0.17
0.21	0.3	3.21	0.69	14.5	10.4	2.09	1.93	0.85	0.2	0.19	0.3
0.32	0.39	0.79	4.05	4.8	7.54	2.64	3.11	2.83	1.47	1.31	1.31

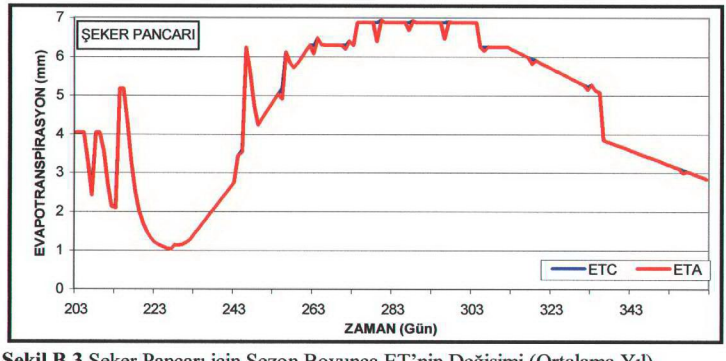
EK B Modelin Çavdarhisar Barajına Uygulaması İle İlgili Sonuçlar



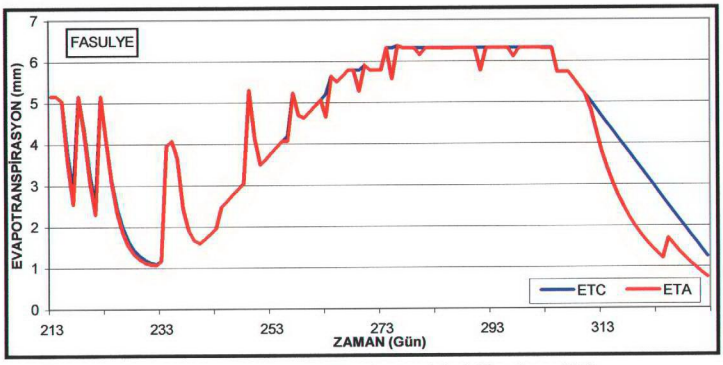
Şekil B.1 Ayçiçeği için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



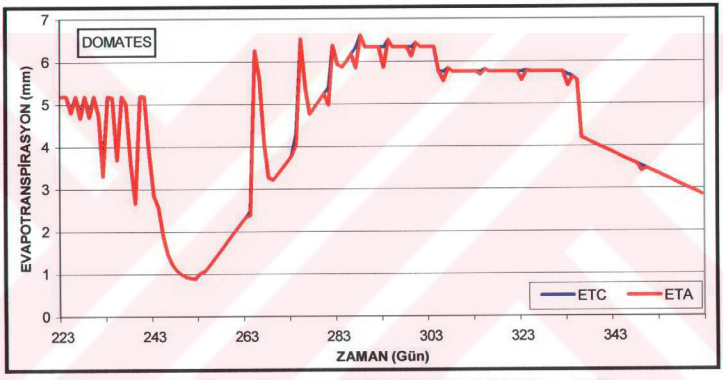
Şekil B.2 Soğan için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



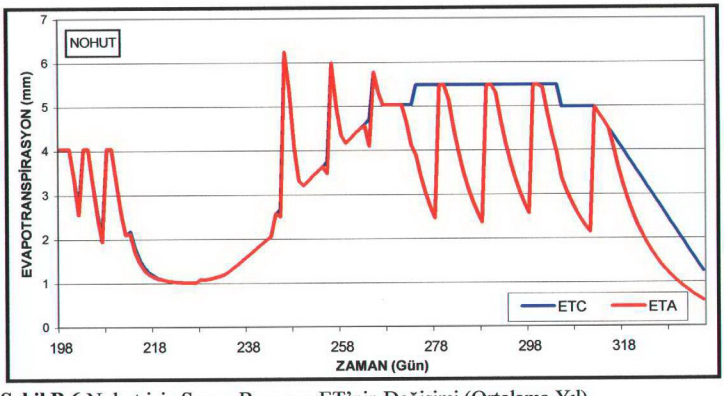
Şekil B.3 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



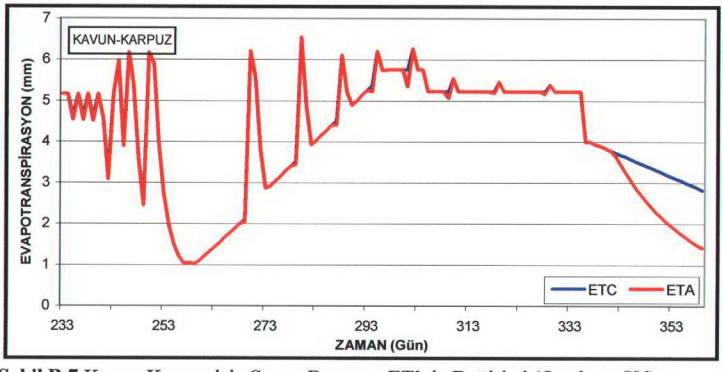
Şekil B.4 Fasulye için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



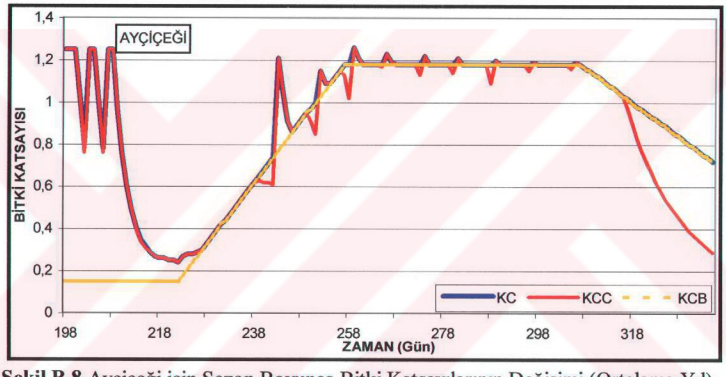
Şekil B.5 Domates için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



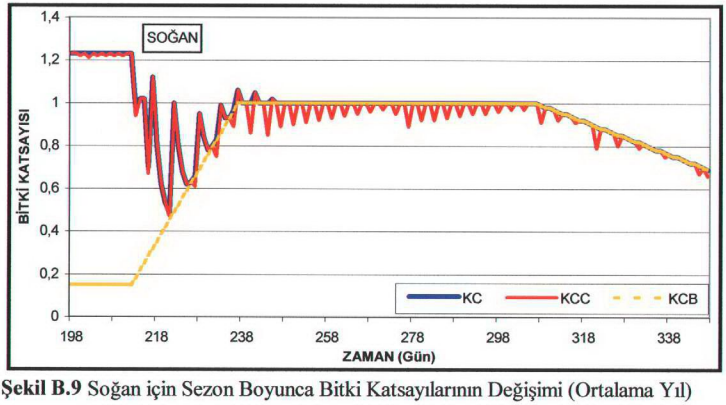
Şekil B.6 Nohut için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



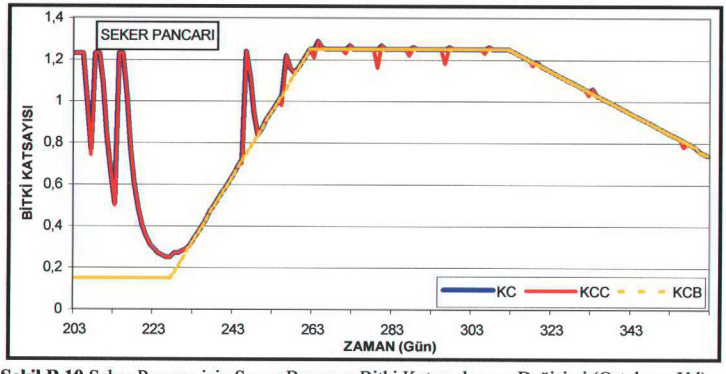
Şekil B.7 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca ET'nin Değişimi (Ortalama Yıl)



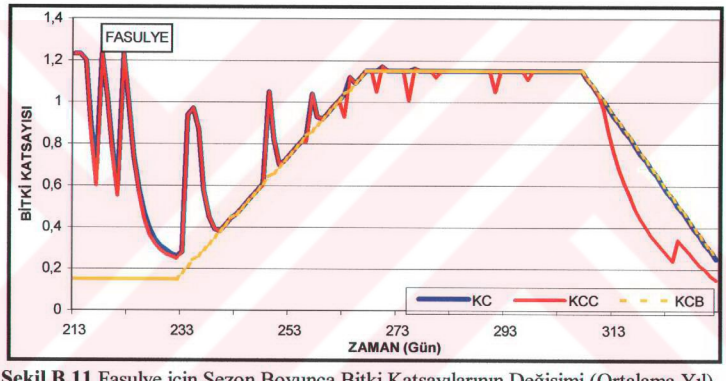
Şekil B.8 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



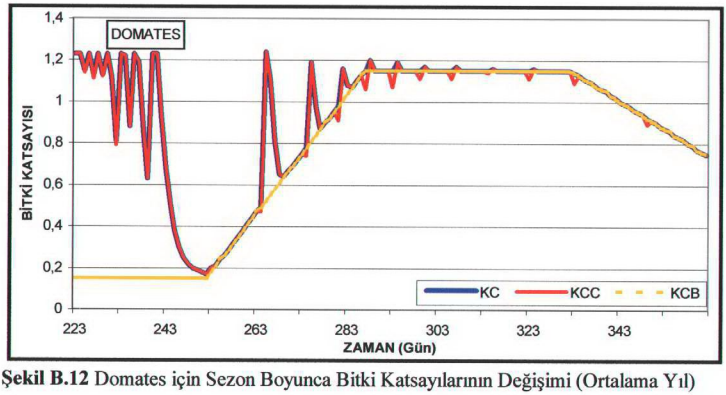
Şekil B.9 Soğan için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



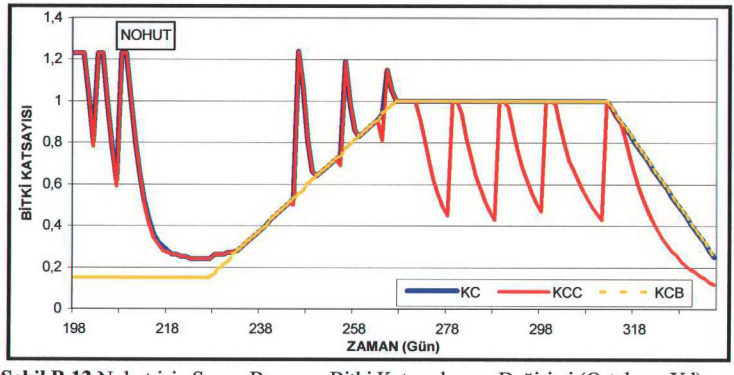
Şekil B.10 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



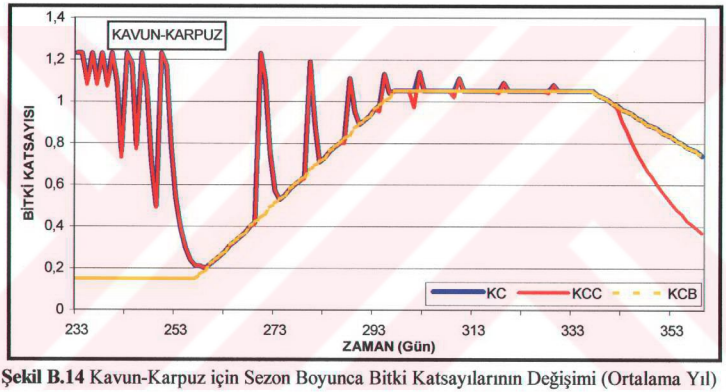
Şekil B.11 Fasulye için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



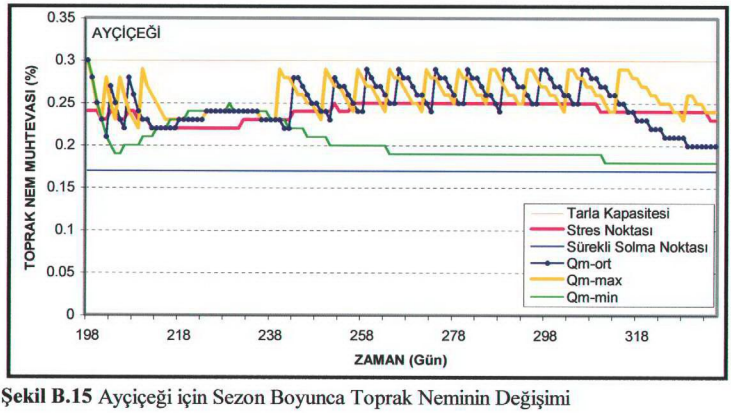
Şekil B.12 Domates için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



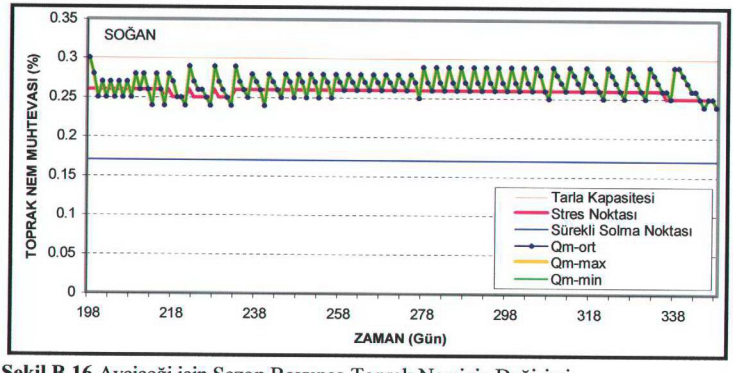
Şekil B.13 Nohut için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



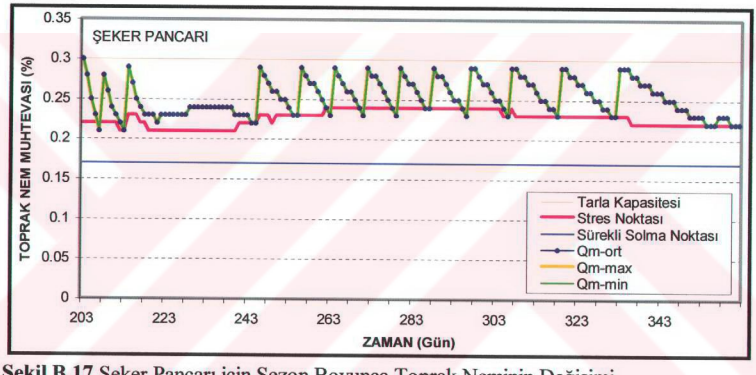
Şekil B.14 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca Bitki Katsayılarının Değişimi (Ortalama Yıl)



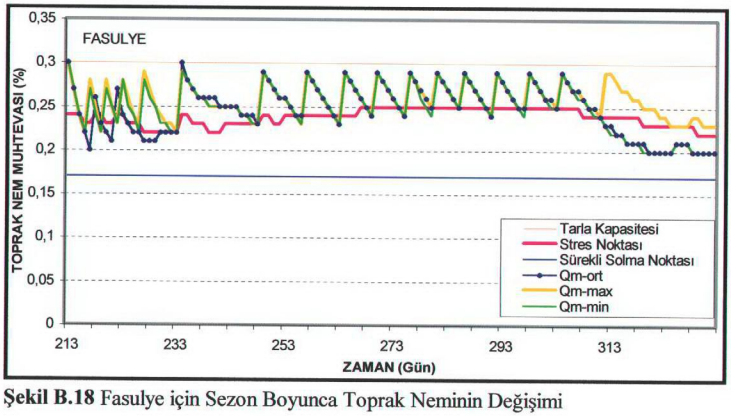
Şekil B.15 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



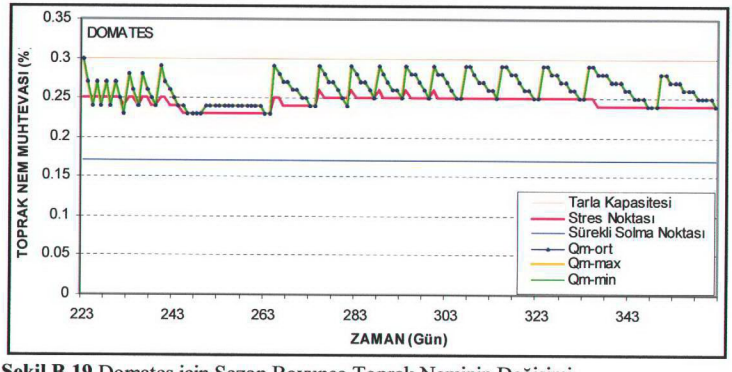
Şekil B.16 Ayçiçeği için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



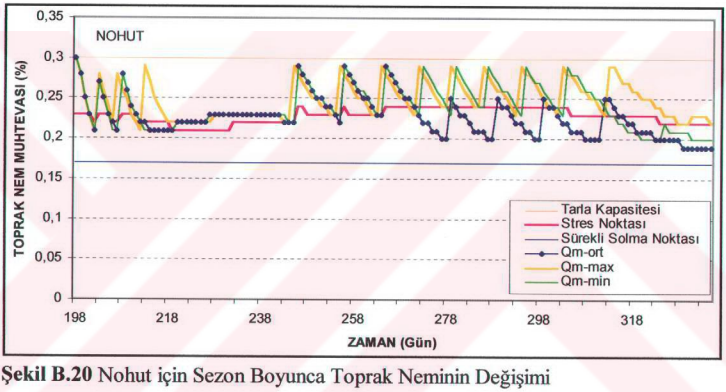
Şekil B.17 Şeker Pancarı için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



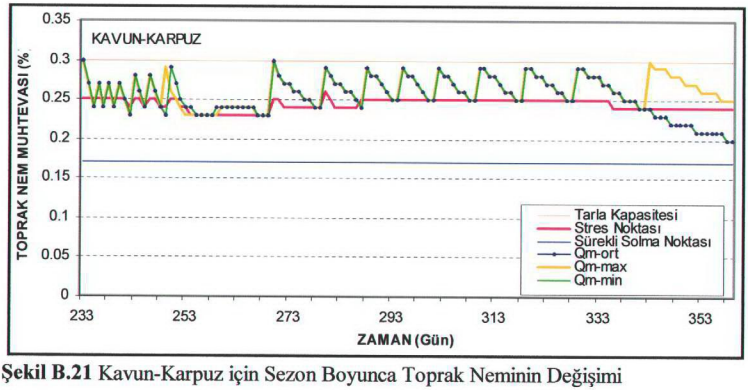
Şekil B.18 Fasulye için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



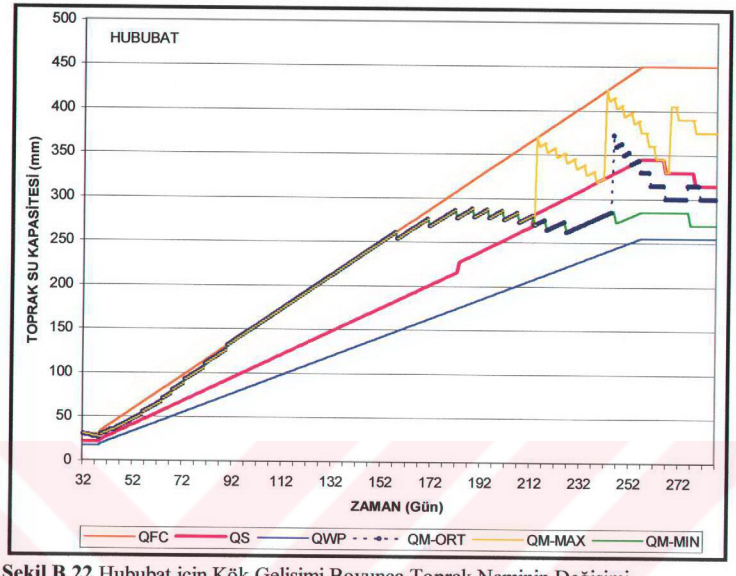
Şekil B.19 Domates için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



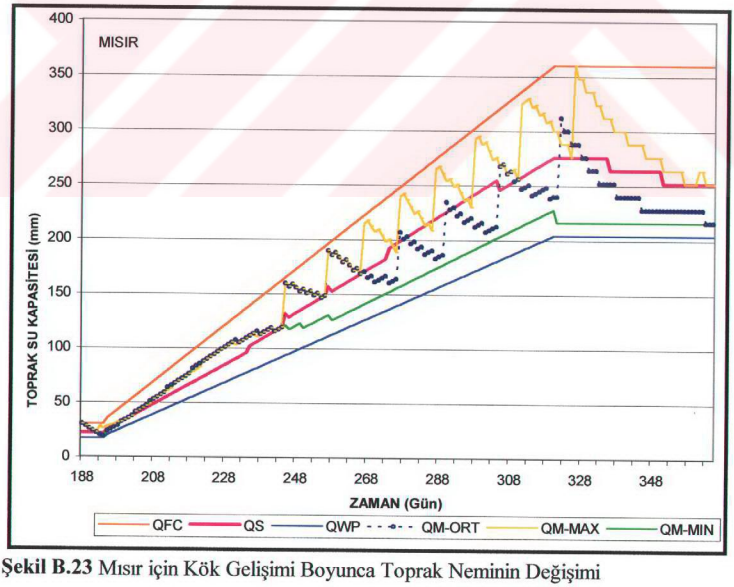
Şekil B.20 Nohut için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



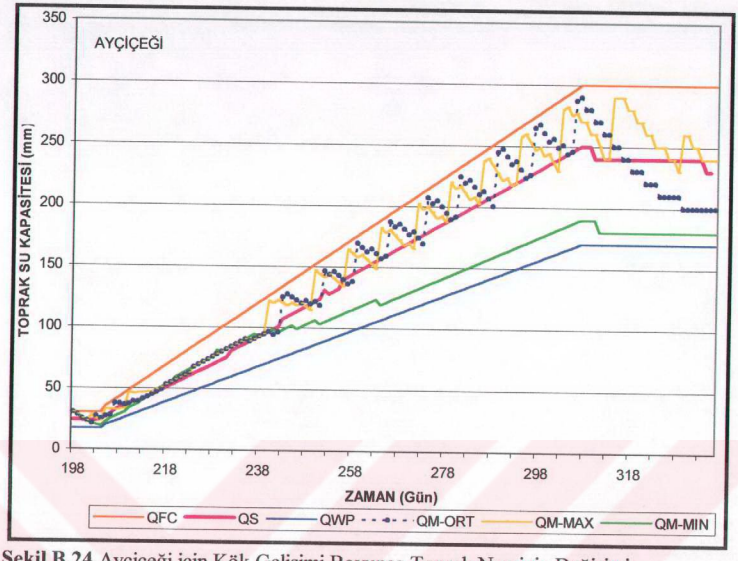
Şekil B.21 Kavun-Karpuz için Sezon Boyunca Toprak Neminin Değişimi



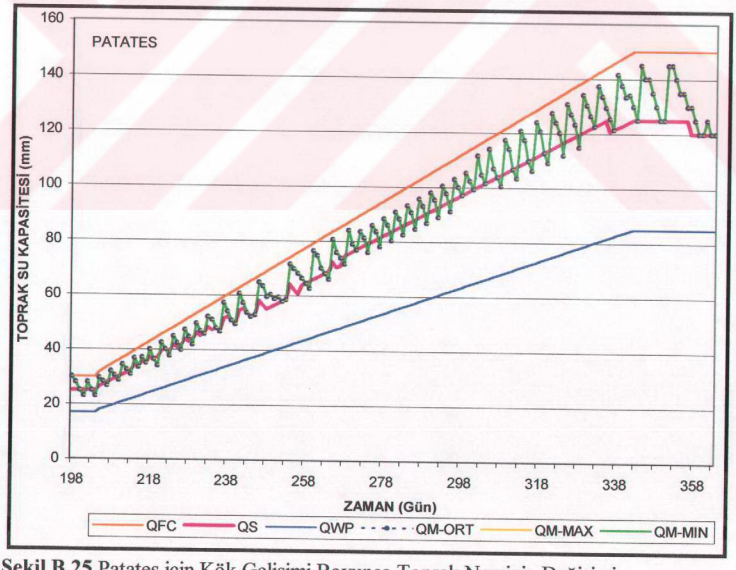
Şekil B.22 Hububat için Kök Gelişimi Boyunca Toprak Neminin Değişimi



Şekil B.23 Mısır için Kök Gelişimi Boyunca Toprak Neminin Değişimi



Şekil B.24 Ayçiçeği için Kök Gelişimi Boyunca Toprak Neminin Değişimi



Şekil B.25 Patates için Kök Gelişimi Boyunca Toprak Neminin Değişimi

Tablo B.1 Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Yükseklikleri (Sulak Yıl)

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN	KARPUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)										
NİSAN	192		11.65									
	200					6.43						
	201			10.2	10.04							
	202					6.96				12.9		
	204			9.99	9.8	6.94						
	206					6.94				12.15		
	207				9.85		13.68					
	208					6.95						
	209			15.09								
	210				9.84	6.96						
	212									16.28		
MAYIS	213	92.3			9.36	9.85	16.23					
	215				7.39							
	216					9.1		11.39				
	217				8.08							
	219							10.9				
	220				11.6							
	222							10.97				
	223				10.73							
	225								8.31			
	226				10.92			13.75				
	227					10.71			8.61			
	229				10.86				8.48			
	232				10.87	10.99			12.55			
	233							17.53				
	235								11.58		9.32	
	236				13.57	10.57						
	237										9.03	
	239			31.4					14.77		9.11	
	240				13.05	12.01						
	241	102.2										
	242										13.3	
HAZİRAN	244		46.12			12.07				27.08		
	245				15.37		35.1				12.4	
	247					11.57						
	248							22.85			13.2	
	249			33.49								
	250					11.68						
	253				16.22	11.73						
	254									29.6		
	255						38.45					
	256		48.76	31.84		11.79		24.23				
	259				16	11.85						
	262					11.9						
	263			35.35			39.21	27.03		32.39		
	264				16.4				29.26			
	265					11.95						
	266		50.35									
	267	74.81										
	268				15.29	12						
	269							27.51			27.8	
	271			40.33	13	12.05	42.78			33.21		

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKER	PANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAVUN	KARPUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)											
TEMMUZ	274				14.8	12.5				30.9			
	275								30.0				
	276		54.5										
	277				16.7	14.6							
	278			39.1							33.2		
	279							48.0					30.3
	280				16.4	14.3			28.1				
	281									32.1			
	283				16.5	14.4							
	285			41.8					28.6		35.1		
	286		61.6		16.6	14.4							
	287							50.1		32.1			31.7
	289				16.6	14.5							
	291								34.5				
	292				16.7	14.5							
	293			47.7						34.5	40.0		
	294												32.5
	295				16.7	14.5							
	296							56.7					
	297		67.6						34.0				
	298				16.8	14.6							
	299									34.4			
	301				16.8	14.6							36.7
	302			53.4							44.5		
	303								34.3				
	304				16.9	14.7							
AĞUSTOS	306							62.1		39.8			
	308				20.9	18.2							
	309												39.8
	310		76.9										
	311								42.3				
	312				20.0	17.0					46		
	313			59.5									
	314									41.3			
	316				20.2	16.6							
	318							67.4					42.3
	320				20.3								
	321					20.1							
	323									46.6			
	324				20.3								
	325		82.2										
	326					18.7							
	327								10.5				
	328			28	20.4								47.0
	330									10.1			
	331					18.0							
	332				20.4		70.7						
	333									51.7			
EYLÜL	337				24.8	20.5							
	342												59.8
	343				24.3								
	345					5.12							
	349									44.1			
	350				26.2								
	356						17.9						
	360		8.43		5.36								

Tablo B.2 Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Miktarları (Sulak Yıl)

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERA RI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KKAVUNUZ	TOPLAM
		SULAMA MİKTARLARI (milyon m^3)										
NİSAN	192		0.05									0.05
	200					0.11						0.11
	201			0.04	0.08							0.12
	202					0.11				0.05		0.16
	204			0.04	0.08	0.11						0.23
	206					0.11				0.05		0.16
	207				0.08		0.06					0.14
	208					0.11						0.11
	209			0.06								0.06
	210				0.08	0.11						0.19
	212									0.07		0.07
MAYIS	213	0.38			0.08	0.16	0.07					0.69
	215				0.06							0.06
	216					0.15		0.05				0.2
	217				0.07							0.07
	220				0.1							0.1
	221					0.16						0.16
	222							0.05				0.05
	223				0.09							0.09
	225								0.14			0.14
	226				0.09			0.06				0.15
	227					0.18			0.14			0.32
	229				0.09				0.14			0.23
	232				0.09	0.18			0.21			0.48
	233							0.07				0.07
	235								0.19		0.15	0.34
	236				0.11	0.17						0.28
	237										0.15	0.15
	239			0.13					0.24		0.15	0.52
	240				0.11	0.2						0.31
	241	0.42										0.42
	242										0.22	0.22
HAZİRAN	244		0.19			0.2				0.11		0.5
	245				0.13		0.14				0.2	0.47
	247					0.19						0.19
	248							0.09			0.22	0.31
	249			0.14								0.14
	250					0.19						0.19
	253				0.13	0.19						0.32
	254									0.12		0.12
	255						0.16					0.16
	256		0.2	0.13		0.19		0.1				0.62
	259				0.13	0.19						0.32
	262					0.2						0.2
	263			0.15			0.16	0.11		0.13		0.55
	264				0.14				0.48			0.62
	265					0.2						0.2
	266		0.21									0.21
	267	0.31										0.31
	268				0.13	0.2						0.33
	269							0.11			0.46	0.57
	271			0.17	0.11	0.2	0.18			0.14		0.8

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERA RI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KKAVUNUZ	TOPLAM
		SULAMA MİKTARLARI (milyon m^3)										
TEMMUZ	274				0.12	0.21			0.51			0.84
	275							0.12				0.12
	276	0.22										0.22
	277				0.14	0.24						0.38
	278			0.16						0.14		0.3
	279							0.2			0.5	0.7
	280				0.14	0.23		0.12				0.49
	281								0.53			0.53
	283				0.14	0.24						0.38
	285			0.17				0.12		0.14		0.43
	286	0.25			0.14	0.24						0.63
	287						0.21		0.53		0.52	1.26
	289				0.14	0.24						0.38
	291							0.14				0.14
	292				0.14	0.24						0.38
	293			0.2					0.57	0.16		0.93
	294										0.53	0.53
	295				0.14	0.24						0.38
	296						0.23					0.23
	297	0.28						0.14				0.42
	298				0.14	0.24						0.38
	299								0.57			0.57
	301				0.14	0.24					0.6	0.98
	302		0.22							0.18		0.4
	303							0.14				0.14
	304				0.14	0.24						0.38
AĞUSTOS	306						0.26		0.65			0.91
	308				0.17	0.3						0.47
	309										0.65	0.65
	310	0.32										0.32
	311							0.17				0.17
	312				0.17	0.28				0.19		0.64
	313		0.24									0.24
	314								0.68			0.68
	316				0.17	0.27						0.44
	318						0.28				0.69	0.97
	320				0.17							0.17
	321					0.33						0.33
	323								0.77			0.77
	324				0.17							0.17
	325	0.34										0.34
	326					0.31						0.31
	327							0.04				0.04
	328		0.12	0.17							0.77	1.06
	330									0.04		0.04
	331					0.3						0.3
	332			0.17		0.29						0.46
	333								0.85			0.85
EYLÜL	337			0.21	0.34							0.55
	342										0.98	0.98
	343			0.2								0.2
	345				0.08							0.08
	349								0.73			0.73
	350			0.22								0.22
	356					0.07						0.07
	360	0.03		0.04								0.07

Tablo B.3 Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Yükseklikleri (Kurak Yıl)

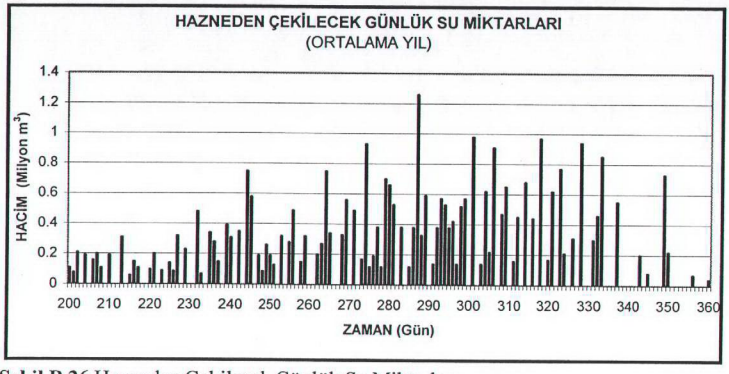
AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAAVRUNUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)									
NİSAN	200					6.43					
	201				10						
	202					6.96				10.9	
	204				9.8	6.94					
	206					6.94					
	207				9.85		13.7			13.2	
	208					6.95					
	210				9.84	6.96					
MAYIS	213				9.36	9.85	16.2				
	215				7.39						
	216					9.1		10.7			
	217				8.08						
	219							10.7			
	220				11.6						
	221					10					
	222							10.5			
	223				10.7						
	225								8.31		
	226				10.9			13.1			
	227					10.7			8.61		
	229				10.9				8.48		
	232				10.9	11			12.6		
	233							17.6			
	235								11.6		9.1
	236				13.6	10.6					
	237										9.0
	239								14.8		9.0
	240				13.1	12					
	242										13.
HAZİRAN	244					12.1					
	245				15.4		35.1			28.2	12.
	247					11.6					
	248							22.8			
	249										15.
	250					11.7					
	253				16.2	11.7					
	255						38.5			30	
	256					11.8		24.2			
	259				16	11.9					
	262					11.9					
	263						39.2	27			
	264				16.4				29.3	33	
	265					12					
	268				15.3	12					
	269							26.1			27.
	271				13	12.1	42.8				
	272									32.6	

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKERPANCARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KAAVRUNUZ
		SULAMA YÜKSEKLİKLERİ (mm)									
TEMMUZ	274				14.9	12.5			30.9		
	275							29.8			
	277				16.8	14.6					
	279						48.1			33.9	30.
	280				16.4	14.3		27.8			
	281								32.2		
	283				16.6	14.4					
	285							28.4			
	286				16.6	14.5				34.9	
	287						50.1		32.1		31.
	289				16.7	14.5					
	291							34.3			
	292				16.7	14.6					
	293								34.6		
	294									39.9	32.
	295				16.8	14.6					
	296						56.7				
	297							33.7			
	298				16.8	14.6					
	299								34.5		
	301				16.9	14.7					36.
	303							34.1		44.4	
	304				16.9	14.7					
AĞUSTOS	306						62.2		39.8		
	308				21	18.2					
	309										39.
	312				20	17.1					
	314								41.4		
	316				20.3	16.7					
	318						67.5				42.
	320				20.3						
	321					20.1					
	323								46.7		
	324				20.4			9.41		15.8	
	326					18.8					
	328				20.4						47.
	331					18					
	332				20.5		70.7				
	333								51.7		
	337				24.9	20.5					
EYLÜL	343				24.4						
	345					5.12					
	349								44.2		
	350				26.2						
	356						18				
	360				5.36						

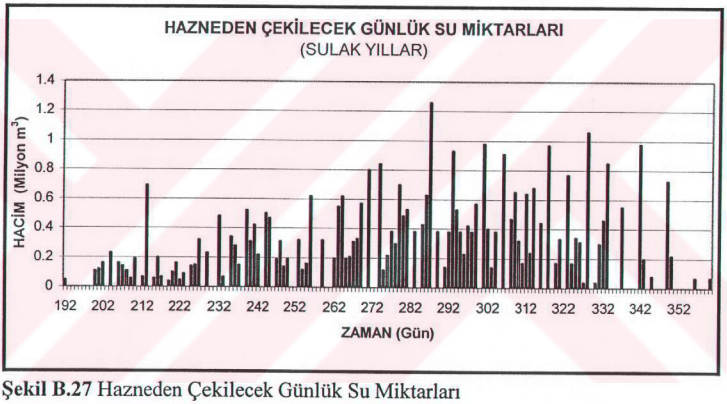
Tablo B.4 Sezon Boyunca Bitkilere Verilecek Su Miktarları (Kurak Yıl)

AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKNECRARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KKAVRUNUZ	TOPLAM
		SULAMA MİKTARLARI (milyon m^3)										
NİSAN	192		0.05									0.05
	200					0.11						0.11
	201			0.04	0.08							0.12
	202					0.11				0.05		0.16
	204			0.04	0.08	0.11						0.23
	206					0.11				0.05		0.16
	207				0.08		0.06					0.14
	208					0.11						0.11
	209			0.06								0.06
	210				0.08	0.11						0.19
	212									0.07		0.07
MAYIS	213	0.38			0.08	0.16	0.07					0.69
	215				0.06							0.06
	216					0.15		0.05				0.2
	217				0.07							0.07
	220				0.1							0.1
	221					0.16						0.16
	222							0.05				0.05
	223				0.09							0.09
	225								0.14			0.14
	226				0.09			0.06				0.15
	227					0.18			0.14			0.32
	229				0.09				0.14			0.23
	232				0.09	0.18			0.21			0.48
	233							0.07				0.07
	235								0.19	0.15	0.34	
	236				0.11	0.17						0.28
	237									0.15	0.15	
	239			0.13					0.24	0.15	0.52	
	240				0.11	0.2						0.31
	241	0.42										0.42
	242									0.22	0.22	
HAZİRAN	244		0.19			0.2				0.11		0.5
	245				0.13		0.14				0.2	0.47
	247					0.19						0.19
	248							0.09			0.22	0.31
	249			0.14								0.14
	250					0.19						0.19
	253				0.13	0.19						0.32
	254									0.12		0.12
	255						0.16					0.16
	256		0.2	0.13		0.19		0.1				0.62
	259				0.13	0.19						0.32
	262					0.2						0.2
	263			0.15			0.16	0.11		0.13		0.55
	264				0.14				0.48			0.62
	265					0.2						0.2
	266		0.21									0.21
	267	0.31										0.31
	268				0.13	0.2						0.33
	269							0.11			0.46	0.57
	271			0.17	0.11	0.2	0.18			0.14		0.8

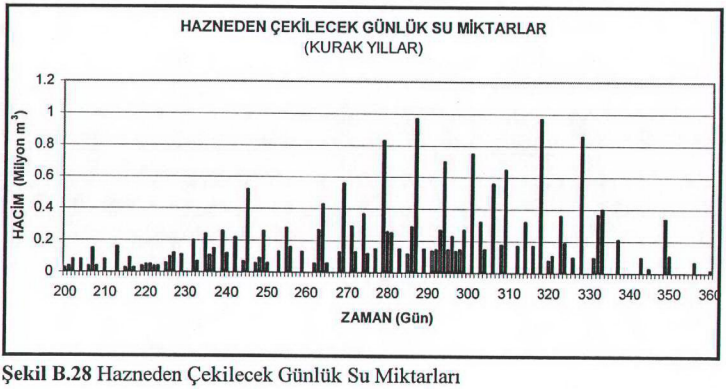
AYLAR	GÜNLER	HUBUBAT	MISIR	AYÇİÇEĞİ	PATATES	SOĞAN	ŞEKNECRARI	FASULYE	DOMATES	NOHUT	KKAVRUNUZ	TOPLAM
		SULAMA MİKTARLARI (milyon m^3)										
TEMMUZ	274				0.12	0.21			0.51			0.84
	275							0.12				0.12
	276	0.22										0.22
	277				0.14	0.24						0.38
	278		0.16							0.14		0.3
	279						0.2				0.5	0.7
	280				0.14	0.23		0.12				0.49
	281								0.53			0.53
	283				0.14	0.24						0.38
	285		0.17					0.12		0.14		0.43
	286	0.25			0.14	0.24						0.63
	287						0.21		0.53		0.52	1.26
	289				0.14	0.24						0.38
	291							0.14				0.14
	292				0.14	0.24						0.38
	293		0.2						0.57	0.16		0.93
	294										0.53	0.53
	295				0.14	0.24						0.38
	296						0.23					0.23
	297	0.28						0.14				0.42
	298				0.14	0.24						0.38
	299								0.57			0.57
	301				0.14	0.24					0.6	0.98
	302		0.22							0.18		0.4
	303							0.14				0.14
	304				0.14	0.24						0.38
AĞUSTOS	306						0.26		0.65			0.91
	308				0.17	0.3						0.47
	309										0.65	0.65
	310	0.32										0.32
	311							0.17				0.17
	312				0.17	0.28				0.19		0.64
	313		0.24									0.24
	314								0.68			0.68
	316				0.17	0.27						0.44
	318						0.28				0.69	0.97
	320				0.17							0.17
	321					0.33						0.33
	323								0.77			0.77
	324				0.17							0.17
	325	0.34										0.34
	326					0.31						0.31
	327							0.04				0.04
	328		0.12	0.17							0.77	1.06
	330									0.04		0.04
	331					0.3						0.3
	332				0.17		0.29					0.46
	333								0.85			0.85
EYLÜL	337				0.21	0.34						0.55
	342										0.98	0.98
	343				0.2							0.2
	345					0.08						0.08
	349								0.73			0.73
	350				0.22							0.22
	356						0.07					0.07
	360		0.03		0.04							0.07



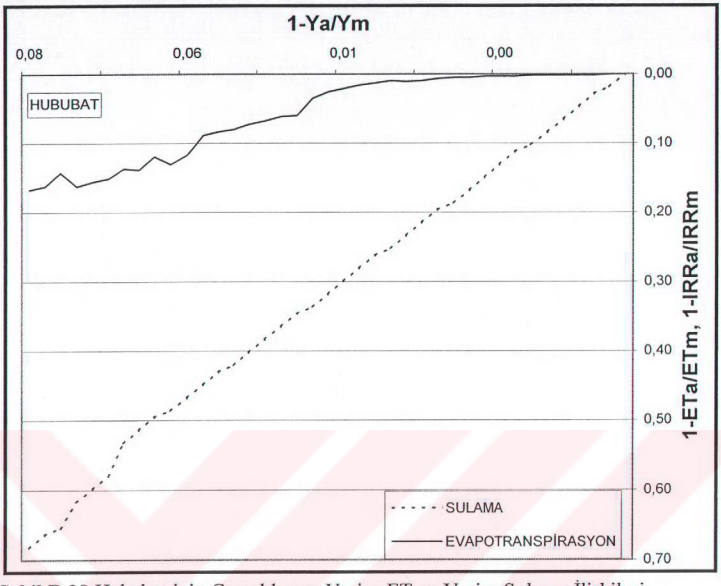
Şekil B.26 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları



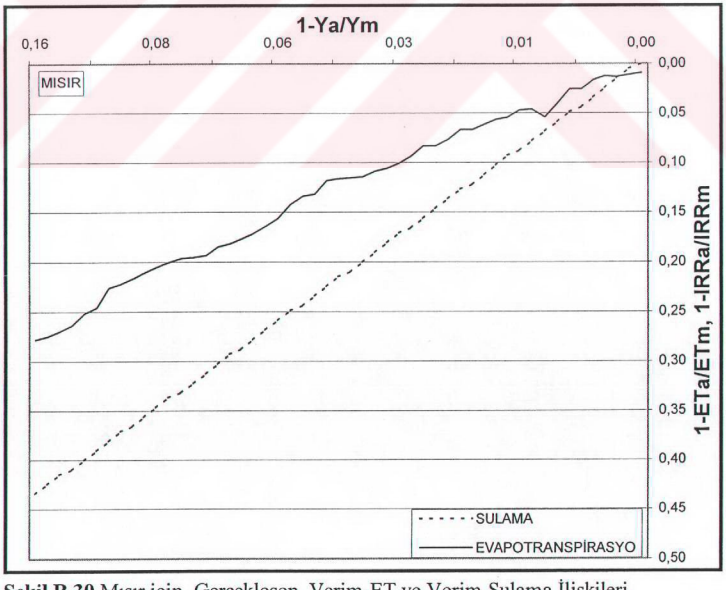
Şekil B.27 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları



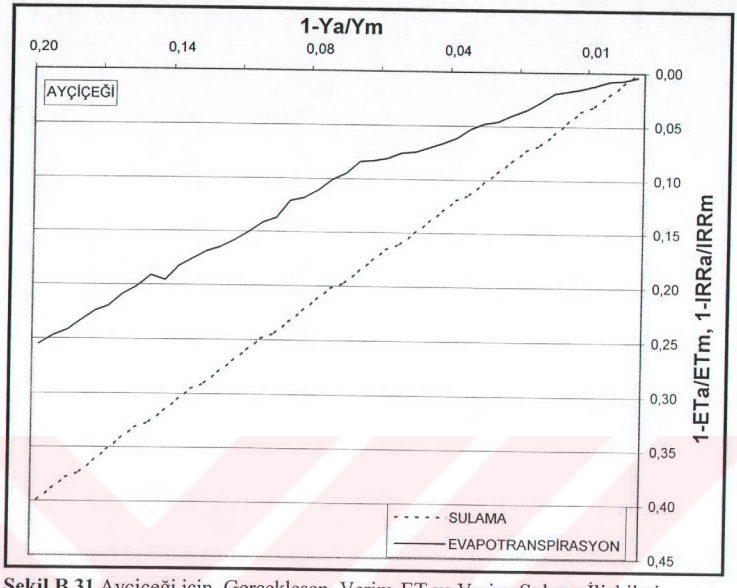
Şekil B.28 Hazneden Çekilecek Günlük Su Miktarları



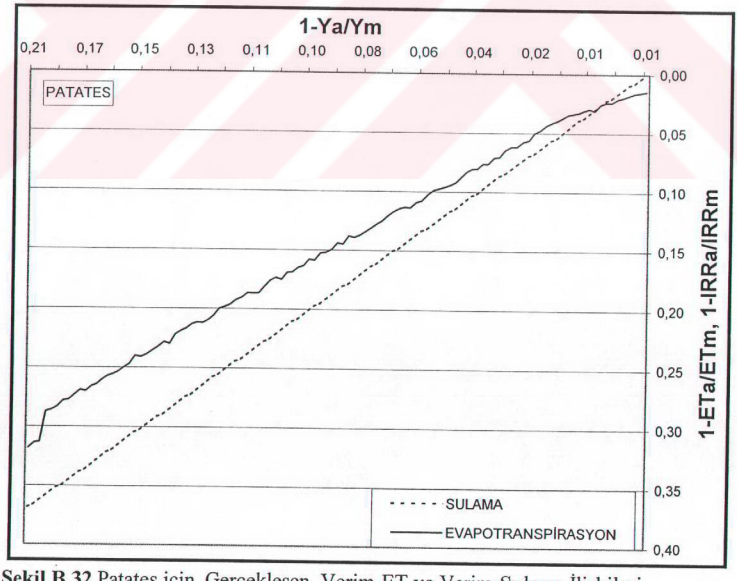
Şekil B.29 Hububat için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri



Şekil B.30 Mısır için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri



Şekil B.31 Ayçiçeği için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri



Şekil B.32 Patates için Gerçekleşen Verim-ET ve Verim-Sulama İlişkileri

ÖZGEÇMİŞ

Sabahattin IŞIK 1967 yılında İstanbul-Şile'de dünyaya geldi. İlk ve orta eğitimini Şile'de tamamladı. 1984 yılında Haydarpaşa Lisesini bitirdikten sonra aynı yıl Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 1987 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesine yatay geçiş yaptı ve 1988 yılında mezun oldu. 1988 yılında DSİ yurtdışı bursunu kazandı. 1989 yılında ilk 6 ay Ortadoğu Teknik Üniversitesinde, son 6 ay ise American Language Academy-Tampa, Florida'da lisan kursu aldı. 1990 yılında University of Colorado, Boulder'da İnşaat Mühendisliğinde Su Kaynakları Mühendisliği konusunda Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 1991 yılı sonunda mezun oldu. 1992 yılından itibaren 2.5 yıl DSİ Genel Müdürlüğü Etüd ve Plan Daire Başkanlığında planlama mühendisi olarak çalıştı. 1994 yılından itibaren Dumlupınar Üniversitesi Kütahya Meslek Yüksekokulunda 1.5 yıl süreyle öğretim görevlisi olarak inşaat mühendisliği ve bilgisayar konularında çeşitli dersler verdi. 1996 yılında, halen görevli olduğu Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak geçiş yaptı.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ