

Cros, Marie-Josée, Frédérick, Garcia, Roger Martin-Clouaire, and Jean-Pierre Rellier. 2006. Section 3.1 Modeling and Simulation, pp. 109-124, of Chapter 3 Methods, Algorithms, and Software, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Çevirmen: Adil Koray YILDIZ

Çeviri Editörleri: Sefa TARHAN ve Mehmet Metin ÖZGÜVEN

## 3. Bölüm: Yöntemler, Algoritmalar ve Yazılım

### 3.1 Modelleme ve Simülasyon

Yazarlar: M.-J. Cros, F. Garcia, R. Martin-Clouaire ve J.-P. Rellier

Çevirmen: Adil Koray YILDIZ

**Özet:** Modelleme ve simülasyon her türlü sistemin mühendisliğinde, özellikle üretim yönetimi sorunlarının çözümünde önemli rolleri olan varlıklardır. Bu bölümde, tarımsal üretim sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonunun temelleri ve önemli konu başlıklarıyla ilgili genel bir bakış sunulmaktadır. Yapı çeşitlerine, süreçlere, gereksinimlere ve yönetim faaliyetlerinin ve biyofiziksel bileşenlerin altında yatan etkileşimli süreçlerin modellenmesinde ele alınması gereken zorluklara özellikle dikkat çekilmiştir. Simülasyon, izlenen çeşitli tekniklerin beklenen performans kriterlerini optimize eden ayarları bulmak için optimizasyon teknikleriyle kombineli olarak kullanılabilir. Bu çalışmada ayrıca, tarımsal üretim sistemi modelinin kalibrasyonu ve doğrulanması da ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tarımsal üretim sistemi, Üretim yönetimi, karar verme, Modelleme, Simulasyon, Optimizasyon.

#### 3.1.1 Giriş

Bilgisayar simülasyon alanı genellikle yapısal modelleme oluşturmak için simülasyon ve simülasyon modelleme ile terimsel modellemenin bütünleşmesidir. Model yapmak, araştırma konusunun ilginç veya kayda değer özelliklerini ve süreçlerini yakalayan bir yapı oluşturmaktır. Model, bir sistemin davranışlarıyla ilgili sanal deneyleri yürütmemize imkan sağlayan, bilgisayara uyarlanmış bir temsil vasıtasıyla söz konusu sistemin basitleştirilmiş tanımıdır. Temel olarak bilgisayar simülasyonu; bir sistemin giriş, üretilen çıkış ve çevresiyle olan etkileşimler gibi dikkate alınması gereken özelliklerini belirleyen bazı süreçlerin taklididir. Bir sistem modeli ise bulunduğu çevrenin bazı ayrıntıları haricindeki gerçekliğinin soyut olarak ifadesidir. Simülasyon mekanizması tarafından bir kez işletilen model, giriş çıkış davranışlarına göre bazı talimat, kural, eşitlik veya kısıt dizilerini içerir.

Simülasyon modelleme hemen hemen tüm disiplinleri kapsayabilecek inanılmaz derecede geniş bir konudur. Modelleme ve simülasyon, özellikle üretim

yönetimi problemleri için kullanılan tüm sistem mühendisliği alanlarında önemli bir araçtır. Bu bölümde ziraat mühendisliğinin ana uygulama alanlarından biri olan tarımsal üretim sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu konusu üzerinde durulmuştur. Performans tahmini, üretim süreci geliştirmek veya tasarlamak, özellikle bu sürecin altında yatan yönetim sorumluluklarını belirlemek için tarımsal üretim sisteminin modellenmesinde sanal deneyler kullanılır. Tarımsal deney sonuçlarının eksik olması veya elde edilmesinin çok pahalı ya da imkansız olması durumunda üretim sistemlerinin simülasyon modelleri kullanışlı olmaktadır. İlgili süreçler hakkındaki bilgilerimizi geliştirerek katkıda bulunabilirler. Ekonomik performans, kaynak kullanımı, fizibilite, farklı iklim senaryoları ve yönetim uygulamaları gibi çevresel etkilerin sistem üzerindeki duyarlılığını incelememize olanak tanırlar. Bu modeller ayrıca deneysel olarak veya matematiksel optimizasyon teknikleri kullanılarak hedeflenen ekonomik amaçlara ulaşmak ve çeşitli kısıtlamaları (kaynak kısıtlılığı, çevre ile ilgili yönetmelikler vb.) karşılamak amacıyla iklim değişkenliklerine uyum göstermemizi sağlayan en uygun yönetim ilkelerini belirlemede kullanılabilir. Buna ek olarak, sistemin nasıl çalıştığını gösterebilme yeteneklerinden dolayı bu modeller eğitim amaçlı kullanılabilir.

Bu bölümde bizim amacımız okuyucuya tarımsal üretim sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu konusunda genel bir bakış açısı sunmaktır. Bölüm 3.1.2 modelin amacı olarak da kullanılabilen modelleme ve simülasyon yaklaşım tiplerini incelemektedir. Bu yaklaşımların altında yatan simülasyon mekanizmaların kısa tanıtımı 3.1.3'de verilmiştir. Sonraki iki bölümde herhangi bir tarımsal üretim sisteminde çalışan iki etkileşimli sürecin modellenmesinin kavramsal yönleri tartışılmıştır. Bunlar üretim sürecinin merkezinde bulunan biyofiziksel üyeler (bitkisel ve/veya hayvansal bileşenlerin özellikleri) ve amaçlanan hedeflere ulaşmak için biyofiziksel sisteme uygulanacak teknik operasyonlarla ilgili kararların sırasıyla alınmasını ve uygulanmasını içeren insan faaliyetlerini dikkate almaktadır. Yönetimin modellenmesinde ele alınması gereken zorluklar, gereksinimler, süreçler ve yapı türleri (3.1.4) ile birlikte biyofiziksel durumlar (3.1.5) üzerine odaklanılmıştır. Bölüm 3.1.6'da bir simülasyon çalışmasında verilen bölgenin muhtemel yapay iklim senaryolarının temsili üretilmesi için gerekli olan iklim jeneratörlerinin kullanımı kısaca tartışılmıştır. Simülasyon, beklenen performans kriterlerini optimize eden ayarların bulunmasını sağlayan optimizasyon teknikleriyle kombinasyon halinde kullanılabilir. Bu konudaki çeşitli yaklaşımlarla ilgili bir değerlendirme bölümü 3.1.7'de verilmiştir. Bir tarımsal üretim sistemi modelindeki kalibrasyon ve doğrulama sorunu bölüm 3.1.8'de ele alınmaktadır. Tarımsal üretim sistemlerinin simülasyon modellerinden beklenen potansiyel faydaları ve bu modellerin yeteneklerinin geliştirilmesini amaçlayan güncel gelişmeler sonuç bölümü olan 3.1.9'da verilmiştir.

### 3.1.2 Farklı Sorular Farklı Modelleme ve Simülasyon İhtiyaçlarını İşaret Eder

Tarımsal üretim sistemleri için birçok bilgisayar modeli geliştirilmiştir. Kendi özel amacına bağlı olarak ve dayandıkları modelleme ve simülasyon yaklaşımı bakımından tasarlanan modeller oldukça farklıdır. Modeller deterministik olabilir. İspat, anlam ya da çözüm aradığımız olgumuzda belirsizlik önemli bir rol oynuyorsa stokastik de olabilir. Üretim sürecinin ara adımları önemsiz ise model durağan olabilir. Eğer zamanla etkileşimleri takip etmek istiyorsanız dinamik yapıda olmalıdır. İstatistiksel ilişkiler bazı durumlar için yeterli olabilirken, mevcut veri aralığının dışında hesaplamalar ve olayların oluş sırasının önemli olduğu hassas ayarlanmış simülasyonlar yapabilmek için bazı süreçlerin işleyişinin mekanik modelleri gerekli olabilir. Dinamik bir model sürekli (örneğin diferansiyel denklem sistemleri) veya farklı anlarda aniden özelliklerin değiştiği ayrık anlı olabilir. Nelerin hesaba katılacağı (iklimsel faktörler) ve stokastik girişlerin olup olmamasına göre simülasyon sistemleri arasında dış çevrenin modeli önemli bir farklılıktır. Son olarak, bir başka ayırt edici özellik, karar verme davranışının gösterimi ve çeşitli üretim kısıtlarının karar verme ve uygulama hesabına katılmasıyla ilgilidir.

Çiftlik veya tarla üretimini bir ölçüde taklit eden bu yazılım sistemlerine kullanımları açısından bakarsak: kullanıcılar yürütme ilerledikçe karar girdileri vererek simülasyonla etkileşime girebilir veya sadece sonuçları izleyebilir. İlk kullanım örnekleri biyofiziksel modellerin tahmin gücünden yararlanan çevrim içi karar verme desteklerine (gerçek veriyi esas alan rehberlik) sahiptir. Tarımsal ürün sorunları veya gereksinimleri (su stresi, gübre ihtiyaçları gibi) zamanından önce tahmin edilebilir ve bilgisayar yardımı ile beklentiler hesaplanabilir veya uygun bir beklenti bilgisayarda test edilebilir [1]. Çevrim içi simülatörün yararlı olduğu bir başka uygulama da belirli bir görevin gerçekleştirilmesi sırasında operatörün çevrim içi tepkilerinin incelenmesidir: simülasyon adım adım ilerlerken (örneğin gün veya hafta olarak) kullanıcı kararları girebilir ve düşük performans veya hataları sayesinde daha iyi işletmeyi öğrenebilir. Bu gibi durumlarda karar verme modeline ihtiyaç yokken bir biyofiziksel sistemin mekaniksel veya deneysel olabilen bir dinamik model gereklidir.

Pasif olarak çalışan simülasyon yazılımları daha yaygındır. Bunlara basit örnekler, bütçeleme analizi ve üretim sistemi yapılandırma modelleridir. Karar değişkenleri içeren basit cebirsel ilişkiler tarafından (bir elektronik tablo modeli) oluşturulmuş bir statik model yeterli olabilir. Bazı parametrelerin belirsizliği durumunda olasılık dağılımları kabul edilebilir ve tahminler Monte Carlo simülasyonu ile yapılabilir. Monte Carlo simülasyonu bu parametrelere bağlı değişkenlerin olasılık dağılımlarını hesaplar. Başka bir uygulama sınıfı olarak simülasyon, işlerin (yani etkileşimlerin) anlaşılır ve tatmin edici bir şekilde ilerlediğini göstermek açısından yardım amaçlı kullanılır. İlgi duyulan üretim sisteminin davranışı hakkında iyi temellendirilmiş, kapsamlı ve paylaşımlı bilgi sağlandığında çiftçilerin ve yayım uzmanlarının da dahil olduğu çok katılımcılı

eğitimler için bu kabiliyet (simülasyon) sanal deneysel platform olarak hizmet edebilir: örnek olarak KDSAT sistem ailesine bakılabilir [2]. Anlaşılır ve kapsamlı görsel sunum sayesinde simülasyon, sistemin nasıl işlediğinin genel olarak anlaşılmasında ve bazı önemli hususların dayandığı yerler hakkında objektif görüş ve fikir birliği oluşturulmasında faydalıdır. Temel model bilhassa karar verme özellikleriyle ilgili olarak hedef kitleye göre az ya da çok karmaşık olabilir. Bu tür sistemlerin, iklim senaryolarına göre ekonomik performans veya yönetim seçeneklerinin çevresel etkisiyle ilgili kaba tahminler vermesi mümkündür. Ayrıca teşhisleri desteklemek ve açıklayıcı amaçlar için kullanılabilir. Gözlemlenen sonuçlardan sorumlu etkileşimlerin kronolojisini sunarak, niçin belli fizyolojik olayların meydana geldiğini anlamamızda yardımcı olabilirler (neden bu büyüme sorunu bu mahsul üzerinde oldu? gibi...).

Genellikle bu sistemler ekin modelleridir ve sabit yönetim seçenekleri kümesinin (yani ekin türleri, ekim zamanı, azot gübreleme oranı) bir formu altında sadece son derece basitleştirilmiş yönetim kararları ele alınmaktadır. Bu iş hattına ait sistemler yönetim uygulamalarının yerini almak ve bir sezon boyunca üretim önündeki engelleri dikkate almak için kısıtlı yeteneklere sahiptir. Bunlar simüle kararların çiftliklerde hem biyofiziksel durumlara hem de işletme kısıtlarına bağlı olarak dinamik koşullara göre planlanmasına ve yapılmasına olanak tanımaz; neyin olabileceğinden ve fizibilite hususlarından bağımsız olarak kararların her simülasyondan önce alınması gerekmektedir. Sonuç olarak, gerçekçi yönetim stratejilerinin ve işletme süreçlerinin değerlendirilmesinde, üretim kaynakları darboğazlarının (yüksek işgücü talebi gibi) belirlenmesinde ve teknik, ekonomik ve sosyal bağlamda meydana gelen değişimlere uyumlu yeni yönetim çözümlerinde yinelenen yerel iyileştirmelerle yapılan tasarımda sınırlı yardım sağlayabilir. Simülasyon yaklaşımını kullanarak yönetimle ilgili meseleleri ele almak için bu sınırlamaların üstesinden gelmek, hala üretim sistemi modelinin ayrılmaz bir parçası olan insan faaliyetlerinin modellenmesini içeren ve aşılması gereken bir zorluktur. İnsan faaliyetlerinin modellenmesinde nelerin olduğu bir sonraki bölümün konusudur. Daha sonraki bölümde de modellemenin biyofiziksel yönleri ele alınacaktır.

### **3.1.3 Simülasyon Mekanizmaları**

Önceki bölümde tartışıldığı gibi modelleyicinin sistemleri temsil yolları modelin amacına bağlı olarak farklı olabilir. Temel simülasyon algoritmaları seçilen modelleme yaklaşımına özgüdür. Zeigler ve ark. tarafından hazırlanan kitap [3], popüler elektronik tablo yaklaşımıyla birlikte bu bölümde kısaca sunulan, sürekli ve ayrık sistem yaklaşımları hakkında iyi bir teknik referanstır.

#### ***Elektronik Tablo Simülasyonu***

Elektronik tablo simülasyonu, simülasyonun modelini temsil etmek ve simülasyon deneyleri yapmak için platform olarak bir elektronik tablonun kullanımı

anlamına gelir. Çalışma değişkenleri arasında mantıksal ilişkilerin kurulduğu (yani rasyon analizi) ve matematiksel olarak temsil edilen basit statik modeller ile tanımlanabilen, tarımsal üretim sistemi uygulamaları için genellikle elektronik tablo simülasyonu kullanılır (örneğin, [4]). Esasen; bir elektronik tablo, satır ve sütun hücrelerinden oluşan bir elektronik ızgaradır. Her bir hücre ayrı ayrı ele alınabilir ve veri veya formül içerebilir. Çözüm mekanizması veri hücresinde meydana gelen herhangi bir değişimi, doğrudan ya da dolaylı olarak veri hücrelerini dikkate alarak formül hücrelerine yayar. Veri hücreleri rastgele sayılarda ve farklı yayılımında olabilir. Daha sonra Monte Carlo hesaplama tekniklerini kullanır.

Elektronik tablo simülasyonu kolay kullanımı, kolay öğrenilen ara yüzü ve yaygın kullanımı sayesinde çok popülerdir. Fakat bu yaklaşım, daha sonra sunulacak yaklaşımlardan birini kullanan özel simülasyon araçlarını gerektiren karmaşık modeller için tavsiye edilmez.

### ***Sürekli Sistemler***

Sürekli sistem yaklaşımı, sürekli durum değişkenleri ve zamanı, diferansiyel denklem sistemleri ile ifade eder. Yani durum değişkenlerinin değişim oranları türev fonksiyonları ile tanımlanır. Bu yaklaşımın tarımsal üretimin sisteminin modellenmesinde kullanıldığı bir örnek için kaynak [5]'e bakılabilir. Simülasyon mekanizması, ayrıklaştırılmış zaman temelini kullanan Runge-Kutta veya Euler metodu gibi sayısal integratöre (entegre edicilere) dayanmaktadır [6].

Sistem dinamiği [7] yazılımı, model yapısının grafiksel sunumunu destekleyen bir çerçeve içerisinde bu yaklaşımı uygular. Sistem dinamiği modelleri temelde pozitif ve negatif geri besleme döngülerini temsil eden çevrimsel ilişkilerle ilgilidir. Bu yaklaşım; örneğin yeniden yapılandırma sürecinde, sistemleri stratejik analiz için gereken detaylandırılmış analizden daha uygun olan çok yüksek bir soyutlama seviyesiyle ele alır. Sonraki iki yaklaşım bu sonuncu amaç için daha çok kullanılmaktadır.

### ***Ayrık Zamanlı Sistemler***

Ayrık zamanlı sistemler (örneğin, [8]) işleyişin kademelendirilmiş bir modunu varsaymaktadır. Sistemin dinamikleri diferansiyel denklemlerle veya genel olarak her biri bir önceki zaman adımı veya girişlerdeki (etkileyen faktörler) durum esas alınarak durum değişkenlerinin nasıl güncellendiğini açıklayan transfer fonksiyonları ile temsil edilir. Simülasyon mekanizması tek adımlı yinelemeli algoritmalara dayanmaktadır. Bunlar bir simülasyon adımından diğerine atlarlar ve şu anki durum ve girişlerden sonraki durumu hesaplar. Her adımda tüm model değişkenleri taranır.

Ayrık zamanlı sistemler, sonlu durum otomat biçimini kapsamaktadır. Hücresel otomatlar genel fiziksel olarak yayılan olaylar (yani enfestasyon çoğalması) veya grup olayları (popülasyon dinamikleri) incelemek için yaygın olarak kullanılan özel bir örnektir.

### ***Ayrık Olay Sistemleri***

Ayrık olay sistem yaklaşımında [9], sistemin dinamik davranışının modellenmesinde ayrık zamanlı sistemler için kullanılan modellemeye benzer bir şekilde geçiş fonksiyonları yerel değişiklikleri belirtir. Buna ek olarak bu yaklaşım, gerçekleştiğinde geçişlere neden olan olayların belirlenmesine dayanır. Ayrık zamanlı sistemler ile en önemli farkı, olay işleme mekanizmasıdır. Bu mekanizma zamanı geldiğinde (olay gerçekleştiğinde) bir ilgili noktadan diğerine atlamayı sağlar. Sadece zaman noktalarını ve güncel olay ile ilgili değişkenleri tarar. Çalışma zamanı süresince olay gerçekleşmez ise durum değişimi olmaz. Simülasyon saati olaya bağlıdır. Kesikli olay simülasyonu planlanmış zamanlarına göre sıralanan olay listesini okuyarak çalışır. Olaylar sırasıyla bu listeden alınarak işleme girer ve durum geçişlerini üreten ilişkisel işlemler yürütülür. İşlem sonuçlarına göre yeni olaylar planlanıp listeye koyulacağı gibi eskileri etkisizleştirilebilir veya listeden atılabilir. Olaylar, sistemin kendi kontrolü altında olmayan çevre şartlarından kaynaklanabilir.

#### **3.1.4 Üretim Sisteminde İnsan Faaliyetleri**

Bölüm 3.1.2’de tartışıldığı gibi, bir simülasyon projesinin temel amacı üretim yönetimini incelemek ise bu sistemi; algılama, karar alma ve işlem uygulamayı kapsayan insan odaklı bir üretim sistemi olarak incelemek gerekmektedir. Böyle bir incelemenin özünde insan aktörleri (karar vericiler ve uygulayıcılar), biyofiziksel birimler (araziler, bitkiler) ve dış çevre olayları (iklim koşulları) arasındaki etkileşimi ve ilişkiyi daha iyi anlama problemi vardır. Böyle bir modelleme girişimi için önkoşul, tarımsal üretim sisteminin bu kısmının anlaşılmasını ve modellenmesini sağlayan bazı temel kavramların ve insan faaliyetlerinin neyle ilgili olduğunun tanımlanması ve belirlenmesini gerektiren kapsamlı bir bakışın gerekliliğidir.

Çiftçilerin yönetsel uygulamalarına çok az dikkat edilmiştir. Fransız Tarım Sistemleri Topluluğu’nun esas düşüncelerini yansıtan analizler için kaynaklar [10] ve [11]’e bakılabilir. Bir yönetici ne tür işlemleri gerçekleştirmeli ve bu yönetsel işlemlerin ayırt edici özellikleri nelerdir? Bütçeleme ve pazarlama yönleri hariç üretimin teknik yönleriyle ilgilenen yönetsel işlevler şunlardır:

- *Organizasyon*, hem materyal (arazi,makine) hem insan (işe alma, görev verme) gibi üretim sistemi kaynaklarını yapılandırmasını kapsar;
- *Planlama*, üretim sezonu boyunca yapılan aktivitelerin ve üretim hedefleri/kısıtlarına uygun gerçekleştirme metotlarının tasarlanmasıdır;
- *Enformasyon ve Bilgi İşleme*. Karar verme, enformasyon ve bilginin işleme yeteneğine bağlıdır (nelerin elde edileceği ve saklanacağı, ne zaman elde edileceği veya çağrılacağı, karar vermede nasıl kullanılacağı, kararlarla ilgili yapay göstergiler doğrudan mı yoksa türevsel bir süreçle mi ifade edileceği gibi). Yönetici gözleme ve kestirim aktivitelerine sahip olmalıdır. Bu aktivitelerde yönetici üretim sisteminin mevcut durumundan ve öngörülen muhtemel evriminden haberdar olmak için bilgi araştırır ve elde eder;

• *Eylemlerin belirlenmesi ve komuta*, mevcut veya beklenen durum (biyofiziksel etki alanındaki) ve kısıtlar (kaynakların uygunluğu ve kullanılabilirliği, faaliyetlerin uyumluluğu) karşısında olası eylem yollarını belirlemek gibi maliyet/fayda değerlendirmeleri, faaliyetlerin uyumluluğu ve sürekliliği, aciliyet (bazı faaliyetlerin bitirilmesi veya son tarihinden önce bir durumun başarılması, tarihe göre belirli kaynakların serbest bırakılması) gibi farklı kriterlerin fonksiyonu olarak eylemlerin seçimi; özel bir tarzda olayların olması için talimatları kapsamaktadır;

• *Olay işleme*, fırsatlar ve rahatsızlıklar için çevreyi inceleme ve planlanan faaliyetlerde değişiklikleri düzenlemek veya yapmak. Örneğin rüzgar sert ise ılaçlamayı ertelemek.

Yönetim görevinde çiftçi; biyofiziksel bileşenler, ilgilenilen sistemin çevre ortamı (dış ortam olayları) ve aldığı kararlardan dolayı artan teknik eylemlerle başa çıkmak zorundadır. Çoğu eylem zamansaldır ve bunların yürütülmesi bozulabilir, sekteye uğrayabilir ve hatta hiç bitmeyebilir. Çiftçi, çalışmayı bilinen ve kullanılan düzenlemelerin fonksiyonu olarak organize etmek için planlı ve tepkisel davranışları birleştirmek ve beklenmedik olaylara uyum sağlamak zorundadır. Bu nedenle, algılama ve zamanında karar alma arasındaki sıkı bağlantı birinci derecede önemlidir. Bir tarımsal üretim sisteminin yönetimi, planın yenilenmesi ve yürütülmesinin iç içe geçmiş olması gereken dinamik bir süreçtir. Çünkü dışsal çevre değişimleri çiftçi kontrolünün dışında dinamiktir ve sisteme etkileri artarak devam eder. Çiftçilerin yönetim görevlerinde karar alma davranışları çeşitli araştırmaların konusu olmuştur. Ama zihinsel sürecin uyarı veya tepkiden hangisine müdahale ettiği ve bu davranışın hangisi tarafından sergilendiği hala büyük ölçüde bilinmemektedir.

Bununla birlikte, yönetim stratejisi kavramı çiftçinin yönetim davranışını ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu yönetim stratejileri yöneticinin kafasında olanları açığa çıkarmayı başaramaz. Daha mütevazı olarak işlerin o anki durumunda çiftçinin neyi önemseydiğini türetmeye çalışmaktadır. Resmi olmayan bir bakışla yönetim stratejisi, elle detaylandırılmış bir yapı olarak görülebilir. Bu yapı, ortama duyarlı uyarlamalarıyla ve gerekli eylemlerin adım adım belirlenmesi ve uygulanmasındaki kısıtları azaltan uygulama detaylarıyla esnek bir plan türünü tanımlamaktadır. Değişen ve öngörülemeyen koşullar nedeniyle planlar, oluşturulan faaliyetlerin zamansal organizasyonu açısından esnektir. Uygulama zamanında koşullar bilinene kadar belirli faaliyetlerin işleyişi geciktirilir. Özellikle, planda tavsiye edilen işlemler üzerindeki kaynakların mevcudiyeti ve duruma bağlı gereksinimler tarafından yapılacak işler şiddetle kısıtlanmaktadır.

İnsan faaliyetlerinin modellenmesi, simülasyon ile gerçekleştirilen çalışmaların temelinde yönetim aşamaları varsa kara kutu tipinde olmamalıdır. Eğer hiçbir açık gösterimi yoksa, bir yönetim stratejisinin başarılı olacağını veya iyileştirilebileceğini

nasıl belirleyebiliriz? Bir insan davranış modeli, üretim sürecine dâhil faaliyetlerin, yürütme süreçlerinin, bilginin, kaynakların, kısıtların ve davranışların hesaplanabilen ve ifade edilebilen gösterimlerine ihtiyaç duyar. Model bize üretim sisteminin tüm parçaları üzerindeki değişikliklerin etkisini belirlemek için imkân vermelidir. Örneğin; bazı faaliyetler eklenir, silinir, değiştirilir veya diğerleri ile farklı koordine edilir ise model; bunun kaynak kullanımına, ekonomik performansa ve ilgili diğer özelliklerine etkisini göstermek zorundadır. Model; üretim sürecinin yönetilmesi ve işletilmesinde ne planlandığını, ne olduğunu, daha genel olarak, gerekli tüm bilgi ve enformasyonu açıkça belirtmelidir. Aracı modelleme [12, 13] ve kurumsal modelleme [14] gibi yapay zekâ alanları, böyle merkezi işleme mekanizmalarının ve bilgi yapılarının temsil edilmesi için ilham verici ve kullanışlı bir dizi biçimsellik sağlar. İnsan faaliyetlerinin bazı modellemelerini içeren tarımsal üretim sistemi örnekleri için kaynak [15-21]'e bakılabilir.

### **3.1.5 Üretim Sisteminin Biyofiziksel Yönlerinin Modellenmesi**

Birçok biyofiziksel model [22] tarımsal literatürde tarif edilmektedir. Fakat çok azı işletme yönetimi modellerini de içeren tarımsal üretim modelleri içinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Örneğin, yayınlanan mera modellerinin çoğu sadece ot büyümesi veya vejetasyon dinamikleri konularına değinir. Ancak bu modeller için bitki/hayvan etkileşimi gerekli olduğundan bu modeller meraya dayalı üretim sistemlerine yönelik kullanılamaz. Modellenecek süreçlerin seçimi, dikkate alınacak yönetim değişkenleri ve ayrıntı seviyesi simülasyon modelinin kullanım amacına göre belirlenmelidir. Tarımsal üretim modelleriyle tümleşik biyofiziksel modeller [23], çiftçinin mevsimsel ölçekte bir çiftlik yönetimi bakış açısı ile farklı uzmanlık alanlarından gelen bilgiyi (ekin bilimi, hayvan bilimi, tarım sistemleri araştırmaları) bütünleştirmesini gerektirebilir. Bu tür modeller genellikle çiftlik ölçeğinde çalışır.

Modellerin dış etkilere ve yönetim süreci boyunca öngörülen eylemlere dinamik tepki gösterebilmeleri gerekir. Yağış, sıcaklık ve güneş radyasyonu gibi iklimsel faktörlerin etkisini de göz önüne almalıdırlar. Çiftçinin değiştirebileceği ana etmenler bu modellerin sürücü değişkenleri içerisinde yer almalıdır (örneğin bir mera odaklı süt üretimi söz konusu olduğunda, gübrelemede nitrojen yoğunluğu, defoliant sıklığı ve şiddeti, inek yem bileşimi gibi). Değerlendirilen yönetim taahhütleri durum değişkenlerini kastettiği için modeller mevcut değerler hakkında yeterince doğru bilgi vermelidir. Biyofiziksel süreçte rol oynayan ve simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde incelenecek olan tüm değişkenleri bünyelerinde bulundurmak zorundadır. Simülasyon modelinin biyofiziksel bileşenini mümkün olduğunca basit oluşturmak, modelin parametrelerini izlenebilir hale getirmek ya da kolaylaştırmak için önemli bir tasarım prensibidir. İlgili parametreler mevcut koşullarda elde edilememişse, bazı biyofiziksel süreçleri çok detaylı modellemek akıllıca olmaz. Ayrıntılı araştırma modellerinin basitçe derlenmesi yeterli değildir. Modelin



amacının getirdiği şartları tanımlayarak başlamak ve sonra zamansal ve mekânsal faaliyet alanının ve kapsamının kabul edilebilir sınırlarının belirlenmesi gerekir. Açıkçası, yüksek soyutlama seviyesi ve dahili süreçlerin kaba tanımı modelin; yerindelik, kullanılabilirlik ve kabulüne engel oluşturmaktadır. Örneğin, modelin temel birimleri olarak bitki veya bitkilerin organları yerine arazi ve meranın seçimi önemli bir tasarım adımı olduğunu göstermiştir. Öncelikli ilgi seviyesinin altında birden fazla hiyerarşik düzeyin varlığı daha iyi bir amaca hizmet etmez çünkü daha büyük bir karmaşıklığa yol açar.

### **3.1.6 Rastgele Girdiler: Stokastik İklim Jeneratörleri**

Yaygın olarak, uzun süreli iklim verileri tarımsal üretim modellerinde farklı yönetim stratejilerinin etkilerini değerlendirmek için gereklidir. Ancak, genellikle uzun süreli iklim kayıtları mevcut değildir ve tarımsal risk değerlendirmelerinde gerekli olan yeterince uzun iklim verileri üretmek için iklim jeneratörlerinin kullanılması gerekmektedir. Stokastik iklim üretici, belirli bir yer için gözlenen iklim verilerini kullanarak aynı istatistiki özelliklere sahip, gün içi ya da bir günlük iklim verilerini (yağış, sıcaklık, güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı gibi) üreten bir modeldir. Stokastik iklim jeneratörleri tarımsal üretim sistemlerinin simülasyon modelleri ile birlikte karar destek sistemlerinde daha fazla ve daha önemli bir rol oynamaktadır. Bunlar genellikle her yönetim stratejisi için farklı çıktı değişkenlerinin (örneğin verim, ekonomik marj, işçilik süresi gibi) olasılık dağılımını tahmin ederek en iyi yönetimi seçmek amaçlı kullanılır. Rastgele iklim jeneratörleri, gerçek zamanlı olarak da kullanılabilir. Gözlemlenen geçerli zaman verileriyle iklim jeneratörü tarafından üretilen olası iklim veri setlerinin kullanılmasıyla örneğin, simüle edilmiş ürün miktarının dağılımı elde edilebilir. WGEN [24] veya LARS-WG [25, 26] gibi çeşitli stokastik iklim jeneratörleri mevcuttur ve tarımsal üretim modellerinde kullanılabilir. Yapı ve karmaşıklık açısından farklılık gösterir.

Ancak, bu jeneratörler genellikle gözlenen bazı günlük iklim verileri esas alınarak, belirli bir yerleşim alanı için model parametrelerinin tahmin edilmesiyle aynı şekilde çalışır. Ve daha sonra bir rastgele sayı üretici kullanarak günlük iklim verisi üretir.

### **3.1.7 Simülasyon Optimizasyonu (Eniyileştirme)**

Bir tarımsal üretim sisteminin optimizasyon hedefi, en uygun beklenen performansı sağlayan en iyi yönetim stratejisinin bulunmasıdır. Bir strateji bir dizi karar kuralı olarak tanımlandığında, dinamik programlama yöntemleri [27] mevcut olduğu için, bu optimizasyon problemi bir kontrol problemi olarak görülebilir. Bu yaklaşıma göre bir stokastik dinamik programlama modeli kullanıldığında simülasyon modelleri, durum geçişlerinin olasılıkları veya karşılıklarını tahmin etmek için kullanılabilir [28]. Bununla birlikte, dinamik programlama yöntemleri, takviyeli öğrenme yaklaşımı sayesinde son zamanlarda elde edilmiş bazı umut verici

gelişmelere rağmen, geniş durum ve karar uzaylarında genellikle kullanılabilir değillerdir. Nörodinamik programlama olarak da adlandırılan bu yaklaşım, simülasyon sırasında dinamik programlama prosedürünün çözümünü yaklaşık olarak temsil eder [30]. Önceden tanımlanmış stratejilerin en iyi parametre değerlerinin hesabında simülasyonun kullanılmasıyla optimizasyon probleminin daha esnek ve gerçekçi bir formülasyonu da aranmış olur. Bu durumda simülasyon modeli, strateji parametreleri vektörü  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_s)$ 'in giriş değişkeni ve çıkışın amaç fonksiyonunun  $J$  olarak alındığı bir kara kutu fonksiyonu olarak kabul edilir. Tarımsal üretim sistemlerinin simülasyon modellerinin çoğunda amaç fonksiyonu  $J$  ayrıca, bilinmeyen ve kontrol edilemeyen bir rastgele değişken olarak kabul edilen  $\xi$  mevcut iklim serisine bağlıdır.

Böylece stratejinin optimizasyonu, ( $J$  modellerini fayda fonksiyonu varsayarak) amaç fonksiyonu  $J$ 'nin beklenen değerini maksimize eden  $\theta^*$  parametre setinin rastgele iklimsel seriye göre aranmasından ibarettir. Matematiksel olarak:

$$\theta^* = \operatorname{argmax} E(J(\theta, \xi)), \quad \theta \in \Theta \quad (1)$$

Değer alanı  $\Theta$ ,  $\mathbb{R}^p$  (reellerin  $p$ -boyutlu Kartezyen ürünü) içinde olduğu zaman, bu stokastik simülasyon optimizasyon problemini çözmek için matematiksel programlamanın en karmaşık problemlerine ait farklı etkin yöntemler geliştirilmiştir [31-33]. 1990'ların başına kadar, bu yöntemler aslında stokastik yaklaşım algoritmalarını içermektedir. Temelde bir takım eğim kestirim türünü kullanarak (örneğin, pertürbasyon analizi)  $\theta^*$ 'ya yaklaşan eğimi arama prosedürleridir. Stokastik yaklaşım, deterministik optimizasyondan en dik alçalma eğimi araştırmasının bir çeşididir. Uygun koşullar altında en uygun yerel parametrelere yakınsama garanti edilebilir. Ayrıca sürekli problemler için tasarlanmış, Nelder Mead (simpleks) yöntemi stokastik yaklaşım için bir alternatiftir. Bunlar eğime dayalı sistemler değildirler fakat bunun yerine arama uzayında bir noktadan diğer bir noktaya geçmek için geometrik bir şekil kullanırlar.

Ayrık optimizasyon problemlerinde 20'den daha fazla elemanı olmayan küçük sonlu bir dizi  $\Theta$  üzerinde en uygun  $\theta^*$  parametresinin seçimi için sıralama ve seçim yöntemleri ile çoklu karşılaştırma işlemleri oluşturulmuştur.  $\Theta$  seti daha büyükse sıralı optimizasyon yaklaşımı önce farklı alternatiflerin kaba bir sıralamasını elde eder ve daha sonra  $r$ 'nin küçük pozitif bir tam sayı olduğu  $r$  üst alternatiflerini tutar ve diğerlerini siler. Daha sonra sıralama ve seçim yöntemleri veya çoklu karşılaştırma yöntemleri,  $r$  adayları arasında en iyi çözüm bulmak için kullanılır. Genel arama yöntemleri de çok kapsamlı ayrık problemleri çözmek için uygulanabilir ve hatta sürekli problemlerin çözümüne adapte edilebilir. Rastgele arama yöntemleri, güncel bir noktadan komşusu olan başka bir noktaya yinelemeli olarak hareket eder ve en uygun genel çözüm kümesine yaklaşımı garanti edilebilir. Son zamanlarda genetik algoritmalar, benzetilmiş tavlama ve tabu arama gibi deterministik optimizasyon yöntemleri de simülasyonla ilgili stokastik ortamına

adapte edilmiştir. Bu yaklaşımda  $E(J(\theta))$  kriteri, çok sayıda  $\xi_i$  değişkenlerinden örneklenmiş amaç fonksiyonu  $J(\theta, \xi)$ 'nin ortalaması alınarak tahmin edilmektedir.

$$E(J(\theta, \xi)) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} J(\theta, \xi_i) \quad (2)$$

$\xi_i$  ler sabit olduğunda, amaç değişkeni  $J$  giriş değişkenleri  $\theta$ 'nın deterministik bir fonksiyonu olur ve bir dizi klasik optimizasyon algoritması kullanılabilir. Ancak,  $E(J(\theta, \xi))$ 'nin iyi bir tahmini birçok sayıda  $N$  örneğine ihtiyaç duyabilir ve birçok simülasyonun tekrarlı olarak çalıştırılmasını gerektirebilir. Örnek yol optimizasyonu denilen bu teknik, böylece stokastik bir problemi deterministik bir hale dönüştürür. Bu teknik aslında sürekli parametrelili simülasyon optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir ve son zamanlarda bu konuyla ilgili çok çeşitli alanlarda çalışılmıştır.

Daha yakın zamanlarda ayrık küresel optimizasyon problemleri için, özellikle dal sınır metodunun stokastik versiyonu ve arama uzayında rastgele örnekleme yaparak ve hiyerarşik olarak bölümleri belirleyen ve değerlendiren iç içe bölümlendirme yöntemini içeren dallanma yöntemlerinin stokastik sürümleri geliştirilmiştir.

Evrimsel algoritmalar ve diğer standart deterministik optimizasyon yöntemlerinin tümü son yıllarda iyi performans gösterdikleri tarım simülasyon modellerine uygulanmıştır [34]. Bu optimizasyon problemlerinden çoğu, eksiksiz iklim şartları bilgisine dayalı sezon sonrası en iyi yönetim kararlarını optimize etmeye dayalıdır (örneğin [35-39]). Aksine, çok az optimizasyon yöntemi, yukarıda anlatıldığı gibi, amaç fonksiyonun beklenen değerini optimize etmek için tarım sistemlerinde uygulanmıştır. Mera otlatma yönetim stratejisi ile ilgili bazı parametrelerin en iyi değerlerde elde edilmesi için Kiefer-Wolfowitz stokastik eğitim yönteminin kullanılması ile ilgili olarak [40] no'lu kaynağa ve sulama stratejilerinin Nelder-Mead simpleks algoritması kullanılarak optimize edilmesi ile ilgili olarak [41] no'lu kaynağa bakılabilir. Stokastik iklim jeneratörlerinin kolay erişilebilirliği bahsedilen stokastik optimizasyon yaklaşımının hızlı gelişmesine yol açacaktır.

### 3.1.8 Kalibrasyon ve Doğrulama

Kalibrasyon, gerçek dünya verilerine dayalı model yapısında çeşitli parametre değerlerinin tahmin edilmesidir. Böyle bir görev sıklıkla sadece bu amaçlar için tasarlanmış özel istatistikî yazılımlar ile gerçekleştirilir. Bazı durumlarda, modelin uygulanması sırasında gerçek saha ölçümlerinden elde edilen verilerden yararlanarak kalibrasyon modeli de paralel olarak gerçekleştirilir. Model tahminlerinden hesaplanan hatalar ve müteakip ölçümler modelin ayarlanması için geri bildirim olarak kullanılır. Başlangıç modelinin kalibrasyonu için çok az veri bulunduğu veya modellenen süreç zaman içerisinde kendini yenilediğinde bu işlem çok kullanışlıdır. Model kalibrasyonu, planlanana benzer başka bir durum için tahmin edilen parametre

değerlerinin kullanılmasıyla da gerçekleştirilebilir. Bu strateji, model parametresi ithali olarak adlandırılır ve sadece deneyimli kullanıcılar tarafından uygulanmalıdır.

Klasik olarak modelin doğrulaması, gerçek ölçümlere karşı model davranışlarının karşılaştıran deneyleri içerir. Açıkçası bu yaklaşım nispeten az sayıda değişkenler ve parametreler içeren model durumlarında sadece mümkündür. Birkaç aylık sürede, farklı dinamik özelliklerin gerçekçi tahminleri sağlaması beklenen bir tarımsal üretim modeli için doğrulama giderek zorlaşır. Çoğu girdi değişkeninin (iklim ve yönetim) değişim aralığı geniştir ve herhangi bir sistematik araştırmayı engellemektedir. Dolayısıyla, bu tür simülasyon modelleri için uygulamanın tüm etki sahası üzerinde doğrulama yapılması imkansızdır [42]. Dahası, doğal sistemin (üretim sistemi ve iklim) gözlem kayıtları yukarıda belirtilen yönlerin bir kısmından ve ilgili zaman çerçevesinden dolayı yetersiz ve eksiktir. Bu veriler, modelin bazı bölümlerinin standart istatistiksel doğrulamalarını gerçekleştirmek için kullanılabilir olsa da tüm modelin mutlaka kabul edilebilir şekilde çalışacağı konusunda hiçbir güvence yoktur. Bazı hatalar, yüksek bir düzeyde model bileşenlerini bağlanmasıyla ortaya çıkabilir. Modelin bazı parçaları yetersiz seviyede kontrol edilebilir ve bazı etkileşimler tahmin edilmeyebilir.

Mümkün olan tek yaklaşım öznelidir. Bu yaklaşımda tarımsal üretim alanında çalışan bilim adamı ve uzmanlara simülasyon sonuçları verilir ve model davranışlarının tutarlı ve makul ölçüde doğru olup olmadığı sorulur. Daha sonra doğrulama sürecinde görev alan bilgili insanların beklentileriyle simülasyon sonuçlarının uyumlu olup olmadığı kontrol edilir. Ayrıca doğrulama, tüm simülasyon sisteminin geliştirilmesinin bir bölümüdür. Biyofiziksel modelde düzeltici değişiklikleri yapmak için doğrulama sonuçları geribildirim olarak alınır. Nihayetinde doğrulama, bilgisayara aktarılmış modelin kendi uygulama alanı içerisinde olacak şekilde modelin planlanan uygulama alanıyla tutarlı ve kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğunun ispatını sağlamalıdır.

Modelin geçerliliği, belirli bir yönetim stratejisi tarafından tetiklenen biyofiziksel sistem davranışının aslına sadık ve doğru olarak üretme yeteneği, farklı iklim desenleri için duyarlılığı ve tutarlılığına göre tanımlanmaktadır. Model tarafından sağlanan çıkış sonuçlarının bir fonksiyonu olarak kabul edilen ve kullanıcı tarafından tanımlanan kriterlere göre stratejiler değerlendirilir. Tipik olarak, kriterler önemli olayların dinamikleri ve zamanlamaları veya anlamlı niceliklerin büyüklük veya eğilimleriyle alakalıdır.

Daha özel olarak değerlendirmede kullanılacak çıkış türleri şunlardır:

- Model değişkenlerinin günlük değerlerinin zaman serisi;
- İşlemlerin tarihleri ve süreleri;
- Kullanıcı tanımlı değişkenlerin günlük değerlerinin zaman serisi, yani denetim amacıyla ya da ilgili karar göstergelerinin sentezlenmesi için model değişkenlerinin fonksiyonları olarak tanımlanan değişkenler;

- Önemli olayların takvimi, yani ilgili karar durumlarının gerçekleşme tarihleri;
- Farklı iklim senaryoları için simüle değişken değerlerinin histogramları.

Özel bir çiftlik yapısı ve yönetimi için elde edilmiş çıkışların analizi, simülasyon için varsayılan iklim deseni kullanılarak yapılmalıdır.

### 3.1.9 Sonuç

Karmaşık sistemleri oldukları gibi modelleme yetenekleri sayesinde simülasyon modelleri tarımsal üretim sistemlerinin tasarımı, eğitim öğretimi ve araştırması için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu bölümde anlatıldığı şekliyle simülasyon, yönetim uygulamalarını değerlendirmemize imkan sağlar, bu uygulamaların hangi durumlarda kabul edilebilir bir başarı veya başarısızlık gösterdiğini sebepleriyle anlamamızı sağlar. Yaklaşım, üretim süreçlerinin kabul gören sosyal normlarla uyumlu olduğunu önceden göstermek için daha ikna edici bir kanıt sağlamak için kullanılabilir. Simülatörler sistemin karmaşıklığı nedeniyle kimsenin el atmadığı bir dizi dış çevre senaryolarında anlaşılır ve güvenilir tahminler yapabilir. Özellikle, belirsizlik analizi (bir yönetim analizinin ne kadar etkin olduğu), zamanlama analizi (göreceli bir olayda veya mutlak bir zamanda özelleşmiş bir olay meydana geldiğinde) ve kaynak kullanımı (kritik ihtiyaçlar nelerdir?) analizlerini destekleyebilir. Simülasyon, çiftçilerin yönetim sorunlarına ilişkin fikirlerini canlandırabilir ve özlerinde olan bilgi işleme kabiliyetlerini potansiyel olarak güçlendirebilir. Model geliştiricilerin bakış açısına göre, modelleme faaliyeti, karar alanıyla ilgili yeni düşünme yolları ortaya koyar ve karar alma yöntemlerinin biçimlendirilmesine kısmen yardımcı olur.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, artık simülasyon modellemeleri hesaplama zorluklarıyla sınırlı değildir. Özellikle insan davranışlarının modellemesini içeren ve bu bölümde tartışılan bütün yönleri birleştiren kapsamlı sistemler yeni yeni ortaya çıkmaya başlamıştır.

Çiftlik seviyesindeki entegre modellerin geliştirilmesi yenidir ve öğrenme/keşif sürecini destekleyecek çok az metodolojik destek vardır: simülatörü hangi verilerle besleyeceğimizi nasıl seçeceğiz (neyi deneyeceğiz) ve girişler yönetim stratejileri içerdiğinde çıkışları nasıl inceleyeceğiz. Hassas tarım ve çiftlik düzeyinde etkileşimlerin ötesi gibi tarımsal üretimin bazı yönlerinin, simülasyon modelleme yaklaşımı ile daha fazla araştırılmaya ihtiyacı vardır. Bilginin tekrar kullanımını teşvik ederek ve tarımsal üretim sistemleri için yazılım modülleri veya genel taslakların geliştirilmesiyle modelleme görevi kolaylaştırılabilir.

Tarımsal üretim sisteminin simülasyon modellemesi; bitki ve hayvan bilimleri, tarım sistemleri, tarımsal üretim sistemlerinin ergonomisi, aracı modelleme ve yazılım mühendisliği gibi çeşitli alanların uzmanları arasında çok disiplinli bir işbirliği gerektirir.

Bu bölüm izole bir tarımsal üretim sisteminin modellemesi ve simülasyonu üzerine odaklanmıştır. Bununla birlikte, bireysel üretim sistemi düzeyinde

gözlemlenebilir küçük ölçekli özellikler ile mikro düzeydeki etkileşimlerden ortaya çıkan büyük ölçekli, toplumsal (veya makro) olaylar arasındaki ilişkiyi keşfetmek ve açıklamak için bilgisayar simülasyonu kullanımına artan bir ilgi vardır. Bu kökleri dağıttık yapay zekaya dayanan çok temsilcili simülasyonun konusudur [43]. Çok temsilcili simülasyon yaklaşımlar [44] kaynak paylaşımı (örneğin, sulama suyu) ya da bir toplumun faaliyetlerinin çevresel sonuçlarını içeren tarımsal problemleri incelemek için büyük bir potansiyele sahiptir.

### Kaynaklar

1. Cabelguenne, M., C. A. Jones, and J. R. Williams. 1995. Strategies for limited irrigation of maize in south-western France: A modeling approach. *Trans. ASAE* 38: 507-511.
2. Jones, J. W., G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, L. A. Hunt, P. K. Thornton, P. W. Wilkens, D. T. Imamura, W. T. Bowen, and U. Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer: KDSAT v3. *Understanding Options for Agricultural Production*, eds. G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P. K. Thornton, 157-177. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
3. Zeigler, B. P., H. Praehofer, and T. G. Kim. 2000. *Theory of Modeling and Simulation*. San Diego, CA: Academic Press.
4. Coléno, F. C., and M. Duru. 1999. A model to find and test decision rules for turnout date and grazing area allocation for a dairy cow system in spring. *Agricultural Systems* 61: 151-164.
5. Guerrin F. 2001. MAGMA: A simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and Electronics in Agriculture* 33: 35-54.
6. Burden, R. L., and J. D. Faires. 1989. *Numerical Analysis*. Boston, MA: PWSKENT Publishing Company.
7. Roberts, N., D. F. Andersen, R. M. Deal, M. S. Grant, and W. A. Shaffer. 1983. *Introduction to Computer Simulation: A System Dynamics Modeling Approach*. Boston, MA: Addison-Wesley.
8. Cros, M.-J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2001. Simulating rotational grazing management. *Environment International* 27: 139-145.
9. Rellier, J.-P. 1992. Prediction and design problems in crop management. Proc. 12th International Conference on Artificial Intelligence, Expert Systems and Natural Language 2: 739-748.
10. Aubry, C., F. Papy, and A. Capillon. 1998. Modeling of decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56: 45-65.
11. Papy, F. 2000. Farm models and decision support: A summary review. *Research on Agricultural Systems: Accomplishments, Perspective and Issues*, eds. J.-P. Colin, and E. W. Crawford, 89-107. Huntington, NY: Nova Science Publishers.
12. Wooldbridge, M. J., and N. R. Jennings. 1995. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review* 10(2): 115-152.
13. De Giacomo G., Y. Lespérance, and H. Levesque. 2000. Congolog, a concurrent programming language based on the situation calculus. *Artificial Intelligence* 121: 109-169.
14. Fox, M. S., and M. Gruninger. 1998. Enterprise modeling. *AI Magazine* (fall 98): 109-121.
15. Papy, F., J.-M. Attonaty, C. Laporte, and L.-G. Soler. 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice. *Agricultural Systems* 27: 295- 314.

16. Sherlock, R. A., and K. Bright. 1999. An object framework for farm system simulation. Proc. MODSIM '99, eds. L. Oxley, F. Scrimgeour, and A. Jakeman, 3: 783-788. The Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.
17. Martin-Clouaire, R., and J.-P. Rellier. 2000. Modeling needs in agricultural decision support systems. Electronic Proc. of the XIVth CIGR Memorial World Congress.
18. Bergez, J.-E., P. Debaeke, J.-M. Deumier, B. Lacroix, D. Leenhardt, P. Leroy, and D. Wallach. 2001. MODERATO: An object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling* 137: 43-60.
19. Jeannequin, B., R. Martin-Clouaire, M. Navarrete, and J.-P. Rellier. 2003. Modeling management strategies for greenhouse tomato production. Proc. Of CIOSTA-CIGR V Congress, 506-513.
20. Martin-Clouaire R., and J.-P. Rellier. 2003. A conceptualization of farm management strategies. Proc. of EFITA-03 Conference, 719-726.
21. Cros, M.-J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems* 80: 23-42.
22. Boote, K. J., J. W. Jones, and G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. *Agricultural Systems Modeling and Simulation*, eds. R. Peart, and R. Curry, 651-691. New York, NY: Marcel Dekker Inc.
23. Cros, M.-J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23(2): 105-122.
24. Richardson, C. W., and D. A. Wright. 1984. WGEN: A model for generating Daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8.
25. Racsko, P., L. Szeidl, and M. Semenov. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27-41.
26. Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow, and C. W. Richardson. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climatic Research* 10: 95-107.
27. Kennedy, J. O. 1986. *Dynamic Programming: Application to Agricultural and Natural Resources*. London, UK: Elsevier Applied Science.
28. Epperson, J. E., J. E. Hook, and Y. Mustafa. 1993. Dynamic programming for improving irrigation scheduling strategies of maize. *Agricultural Systems* 42: 85- 101.
29. Bergez, J.-E., M. Eigenraam, and F. Garcia. 2001. Comparison between dynamic programming and reinforcement learning: A case study on maize irrigation management. Proc. 3rd European Conference for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment, ed. J. Steffe, (2): 343-348. France: Agro Montpellier.
30. Sutton, R. S., and A. G. Barto. 1998. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, MA: MIT Press.
31. Andradóttir, S. 1998. Simulation optimization. *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, ed. J. Banks, 307-334. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc.
32. Swisher, J. R., P. D. Hyden, S. H. Jacobson, and L. W. Schruben. 2000. A survey of simulation optimization techniques and procedures. Proc. of the 2000 Winter Simulation Conference, 119-128.
33. Fu, M. C. 2001. Simulation optimization. Proc. of the 2001 Winter Simulation Conference, 53-61.
34. Mayer, D. G., J. A. Belward, and K. Burrage. 1998. Optimizing simulation models of agricultural systems. *Annals of Operations Research* 82: 219-231.
35. Li, M., and R. S. Yest. 2000. Management-oriented modeling: Optimizing nitrogen management with artificial intelligence. *Agricultural Systems* 65: 1-27.

36. Mayer, D. G., J. A. Belward, and K. Burrage. 1996. Use of advanced techniques to optimize a multi-dimensional dairy model. *Agricultural Systems* 50: 239-253.
37. Mayer, D. G., J. A. Belward, and K. Burrage. 1998. Tabu search not an optimal choice for models of agricultural systems. *Agricultural Systems* 58: 243-251.
38. Mayer, D. G., J. A. Belward, and K. Burrage. 2001. Robust parameter settings of evolutionary algorithms for the optimisation of agricultural systems models. *Agricultural Systems* 69: 199-213.
39. Parsons, D. J. 1998. Optimizing silage harvesting plans in a grass and grazing simulation using the revised simplex method and a genetic algorithm. *Agricultural Systems* 56: 29-44.
40. Cros, M.-J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2001. Simulation optimization of grazing management strategies. *Proc. 3rd European Conference for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment*, ed. J. Steffe, (2): 349-354. France: Agro Montpellier.
41. Botes, J. H. F., D. J. Bosch, and L. K. Oosthuizen. 1996. A simulation and optimization approach for evaluating irrigation information. *Agricultural Systems* 51: 165-183.
42. Sargent, R. G. 1999. Validation and verification of simulation models. *Proc. Of the 1999 Winter Simulation Conference*, 39-48.
43. Weiss, G. 1999. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Cambridge, MA: The MIT Press.
44. Bousquet, F., and C. Le Page. 2004. Multiagent simulations and ecosystem management: A review. *Ecological Modelling* 176: 313-332.