

농업 비점오염 평가를 위한

APEX 모델 설명서

(Agricultural Policy/Environmental eXtender Model)



국립농업과학원

National Academy of Agricultural Science



목 차

제1장 서론

제2장 하위 영역 요소(Subarea Component)

2.1 날씨(Weather)

2.1.1 강수(Precipitation)

지점 강우량

공간 분포 강우

기온 및 태양 복사

바람

상대 습도

2.2 수문학(Hydrology)

2.2.1 강우 차단(Rainfall Interception)

2.2.2 지표 유출수(Surface Runoff)

유출량

침투 유출률

2.2.3 지표아래 유동(Subsurface Flow)

2.2.4 증발산(Evapotranspiration)

잠재 증발

토양 및 작물 증발

2.2.5 용설량(Snowmelt)

2.2.6 지하수면역학(Water Table Dynamics)

2.3 토양 침식(Soil Erosion)

2.3.1 수분(Water)

강우/유출수

관개

2.3.2 바람(Wind)

기본 공식

토양 침식성 인자

조도계수

작물피복인자

비보호 거리 인자

2.4 가축분뇨 침식(Manure Erosion)

2.5 양분(Nutrients)

2.5.1 질소(Nitrogen)

질소 유실-침출, 지표 유출수, 측면 지표아래 유동
토양수 증발에 의한 NO₃-N 이동
유사에 의한 유기 질소 이동
탈질소화
탄소와 질소의 순환 및 변환
낙엽 할당과 잠재적 탄소와 질소 변환
실제 탄소 및 질소 변환
토양 용적비중과 층깊이의 역학 관계
질산화
휘산작용
강우

2.5.2 인(Phosphorus)

지표 유출수내 용해성 인 소실
유사에 의한 인 이동
무기화
미네랄 인 순환

2.6 농약 거동(Pesticide Fate)

2.7 토양 온도(Soil Temperature)

2.8 작물 성장 모델(Crop Growth Model)

2.8.1 잠재적 성장(Potential Growth)

2.8.2 용수 사용(Water Use)

2.8.3 양분 흡수(Nutrient Uptake)

질소

인

생장 제한

작물 경합

겨울 휴면

2.9 경운(Tillage)

2.10 작물 환경 제어(Plant Environment Control)

2.10.1 배수(Drainage)

2.10.2 관개(Irrigation)

2.10.3 비료(Fertilization)

2.10.4 중화(Liming)

2.10.5 병해충(Pests)

2.10.6 고랑 제방(Furrow Diking)

2.11 경제성(Economics)

제3장 APEX 추적 요소(APEX Routing Component)

3.1 수분(Water)

3.1.1 일일 단위 법(Daily Time Step Method)

3.1.2 가변 저류 계수 홍수 추적 기법(Variable Storage Coefficient Flood Routing Method)

3.1.3 하위 영역 수문곡선(Subarea Hydrographs)

3.1.4 홍수 추적(Flood Routing)

3.2 퇴적물(Sediment)

3.3 양분(Nutrient)

3.4 농약(Pesticides)

제4장 저류지 구성 요소(Reservoir Component)

제5장 지하수 요소(Groundwater Component)

제6장 방목 요소(Grazing Component)

6.1 가축분뇨 관리(Manure Management)

부록 A 표기법

부록 B 출판물

부록 C 참고자료

제1장 서론

제 1 장 서론

APEX 모델(Agricultural Policy/Environmental eXtender)은 전 농장/소규모 유역 관리에 활용하기 위해 개발되었다. 본 모델은 지속가능성, (바람, 판상 퇴적물 및 물에 의한) 침식, 경제성, 관개 및 수질, 토질, 작물 경합, 날씨 및 해충 등의 요소를 고려한 다양한 토지 관리 전략을 평가하기 위해 구성되었다. 토지 관리 기능은 관개, 배수, 제방, 완충대, 단구, 수로, 비료, 가축분뇨 관리, 저류지, 저수지, 운작 및 작물 선택, 농약 살포, 방목 및 경운 등을 포함한다. 이러한 농장 관리 기능 이외에도 APEX 모델은 지구 기후/CO₂ 변화의 영향을 평가하거나 환경적으로 안전하고 경제적인 매립지 설계, 에너지 획득을 위한 바이오매스 생산 시스템 설계 또는 다른 파생적인 응용 분야에 활용될 수 있다. 본 모델은 일 단위로 운영되나 일부 과정은 시간 단위 또는 그보다 더 짧은 시간 단위로 모의 구동할 수 있다. 또한 필요시에는 수백 년에 이르는 시간에 대한 모의 구동도 할 수 있다. 농장은 경작지, 토양 종류, 지형, 기타 적합한 구성으로 세분화될 수도 있다.

APEX 모델의 각 필지 구동 요소는 1980년대 초 침식이 생산성에 어떠한 영향력을 미치는지 평가하기 위해 개발된 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate) 모델(Williams 등, 1984)에서 유래되었다. CREAMS(Knise, 1980) 및 SWRRB(Williams 등, 1985)의 다양한 요소들이 EPIC 모델을 개발하는데 사용되었고 이 후에 GLEAMS(Leonard 등, 1987) 모델의 농약 관련 기능이 추가되었다. 1985년 국가 RCA 적용(Putman 등, 1988) 이래로 이 EPIC 모델은 지속적인 확장과 개선을 거쳐 농업 경영에 있어 중요한 많은 과정을 모의할 수 있게 되었다(Sharpley와 Williams, 1990; Williams, 1995). EPIC 모델에서 고려된 배수 면적은 일반적으로 최대 100 ha 정도이며 이는 날씨, 토양 및 관리 시스템이 동일하다는 전제조건 하에 있다. EPIC 모델에서 중요한 구성요소는 날씨 모의구동, 수문, 침식-퇴적, 양분 순환, 농약의 분해과정, 작물 생장, 토양 온도, 경작, 경제성 및 작물 환경 제어 등이다. EPIC 모델은 일 단위로 운영되지만 Green-Ampt 침투식을 이용할 경우 더 짧은 시간 간격으로 초과 강우율을 모의할 수 있다(0.1 ha). 이 모델은 기타 여러 과정들을 모의할 수 있는 선택권을 제공하는데 이는 5개의 잠재증발산량 방정식, 6개의 침식/퇴적량 방정식 및 2개의 최대 유출률 방정식 등을 포함한다. 변경 가능한 관리 요소는 운작, 경운 작업, 관개 일정 관리, 배수, 제방 작업, 토양 개량, 방목, 가지치기, 솟음 및 수확, 비료 및 농약 사용량 및 사용시기 조절 등이 있다.

APEX 모델은 EPIC 모델의 기능을 농장 전체 또는 소규모 유역으로 확장하기 위해 개발되었다. EPIC 모델의 기능 이외에 APEX 모델은 복잡한 지형 및 수로 시스템에서 유역 출구까지 여러 영역에 걸쳐 존재하는 물, 퇴적물, 양분 및 농약을 추적하는 기능을 포함한다. 또한 APEX 모델은 지하수 및 저류지 관련 요소를 포함하고 있다. 유역은 여러 영역으로 세분화할 수 있는데 이러한 세분화 과정은 각 영역이 토양,

토지이용 및 관리 및 계절 측면에서 상대적으로 동질성을 가질 수 있도록 필요한 만큼 이루어질 수 있다. 이러한 추적 메커니즘을 통해 표면 유출, 환원수, 침전물 퇴적 및 분해, 양분 이동 및 지하수의 흐름 간의 상호작용을 평가할 수 있다. 각 영역 및 유역 출구에서 (암모니아태, 질산태 및 유기태) 질소, (용해성, 흡착/미네랄 및 유기성) 인 및 농약의 농도 등의 수질 예측이 가능하다. 시판 비료 또는 가축분뇨 등을 자동으로 또는 특정 일자에 원하는 양과 깊이만큼 사용하도록 설정하는 것도 가능하다. GLEAMS 모델 내 농약 모델은 유출량, 침출, 퇴적물의 이동 및 분해 등을 고려하여 농약의 거동을 예측하는데 사용되며 추적 및 세분화 과정이 있기 때문에 유역의 크기는 상관없다.

APEX 모델의 주요 용례로서 APEX 모델은 텍사스 주의 Erath 및 Hopkins 카운티에서 수질을 관리하기 위해 가축분뇨 관리(Flowers 등, 1996)와 퇴적물 및 다른 오염물질을 제어하기 위한 방법으로 여과대의 효과를 평가하는 국책 연구에 활용하였다(Arnold 등, 1998). APEX 모델은 날씨 모의뿐만 아니라 토양, 작물, 경작, 비료 및 농약 등에 대한 자체 데이터베이스를 보유하고 있다. 또한 입력 데이터를 조합하고 산출 결과를 해석하기 위해 편리한 인터페이스가 제공된다.

본 보고서의 목적은 APEX 모델에 대한 완전한 이론적 기술을 제공하는 것으로, 모델 구성 요소들뿐만 아니라 오염원 추적, 저수지, 지하수, 방목 및 가축분뇨 관리 및 농장 먼지 방출 및 분배 관련 요소들을 소개한다. 본 APEX 모델에서는 가장 최근의 보고서에서 제시된 것보다 훨씬 많은 개정과 확장이 이루어졌으므로 앞서 말한 요소들을 자세히 소개하기로 한다(Williams 등, 2000).

제2장 모델의 하위 구성 요소

제 2 장 모델의 하위 구성 요소

2.1 기후(Weather)

APEX 모델을 구동하기 위해 필요한 기상 변수는 일일 강수량, 최대 및 최소 기온 및 일사량 등이 있다. 또한 잠재적인 증발량을 추정하기 위해 Penman 모델을 사용할 경우, 풍속 및 상대 습도 등의 자료가 필요하고 바람에 의한 침식 또는 분진 분출 및 분포 등을 모의할 경우에는 풍속 자료가 필요하다. 일일 강수량, 기온 및 일사량 자료를 직접 이용할 경우에는 이러한 정보를 APEX 모델에 직접 입력할 수 있다. 미국의 많은 지역에서 강우 및 온도 자료는 보유하고 있어 이용 가능하지만, 일사량, 상대 습도 및 바람과 관련된 자료는 매우 부족한 상태이다. 장기적인(100년 이상의) APEX 모델의 구동에는 충분한 강우 및 온도 자료를 구하는 것조차 여의치 않을 수 있다. 따라서 APEX 모델은 이러한 5가지 기상 변수의 다양한 조합을 모의할 수 있는 선택권을 제공한다. 여기에는 다음과 같은 내용이 포함된다.

- 1) 5개의 모든 변수를 생성. 강수량은 유역 위에 균일하게 모의하거나 공간적으로 분포될 수 있다.
- 2) 모든 변수를 입력. 단일 기상 관측소에서 얻은 입력값이 전체 유역을 대표하거나 여러 기상 관측소에서 얻은 자료가 각 측정 하위 영역을 대표할 수 있다.
- 3) 일부 변수 생성 및 기타 입력. 이 경우에 강수량은 무조건 입력값이 되어야 한다.

2.1.1 강수(Precipitation)

지점 강수량(Point Rainfall)

Nicks(1974)이 개발한 APEX 강수량 모델은 1차 Markov chain 모델이다. 따라서 이 모델의 입력값은 반드시 매달 강수가 일어날 확률을 포함해야 한다. 이러한 입력 정보는 전날이 건조한 날이었는지 습한 날이었는지에 대한 정보를 포함해야 한다. 임의의 수(0~1)가 생성되어 적절한 강우 확률과 비교가 이루어진다. 임의의 수가 강우 확률보다 적거나 같을 경우 강수가 해당 일에 발생한다. 임의의 수가 강우 확률보다 더 클 경우 강수가 일어나지 않는다. 첫날의 강우 상태가 확정되면 이 과정은 다음 날 등 모델 구동 기간 전체에 걸쳐 반복될 수 있다.

강수 사상이 발생할 경우 강수량은 편향된 일일 정상 강우 분포량으로부터 다음과 같이 생성된다.

$$RF=XLV*RST(2,MO)+RST(1,MO) \quad (1)$$

$$XLV=(X1^3-1.)*2./RST(3,MO) \quad (1a)$$

$$X1=(SND-R6)*R6+1. \quad (1b)$$

$$R6=RST(3,MO)/6. \quad (1c)$$

여기서 RF는 강우량(mm), MO는 강우가 발생한 달, RST 하부첨자 1, 2, 3은 월별 강우 평균, 표준 편차 및 왜도 계수이며, SND는 표준 정규 편차이다.

표준 편차 및 왜도 계수를 구할 수 없을 경우 이 모델은 수정된 지수 분포도를 사용하여 일간 강우량에 대하여 모의를 한다.

$$RF=(RST(1,MO)/ECF)*(-\ln(rnd))^{EXPK} \quad (2)$$

여기서 rnd는 균일한 임의의 수(0.0~1.0)이며, ECF는 장기적 평균 강우량을 보존하는 보정계수이며, EXPK는 보통 1.0~2.0 사이의 매개변수로 EXPK 값이 클수록 더욱 극심한 강우가 발생한다. 미국의 많은 지역에서는 1.3의 값을 통해 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. ECF는 식(2)를 0에서 1까지 적분하여 구할 수 있다. 수정된 지수값은 보통 만족스러운 대안으로 입력값을 월별 평균 일일 강우량만 필요로 한다.

일일 강수량은 강우 및 강설량으로 나누어지는데 평균 일일 기온(TX)과 표층 토양의 온도(STMP(1))가 0°C 이하이면 강설이 발생했음을 의미하며 그렇지 않을 경우는 강우가 발생한 것이다.

강우 확률을 이용할 수 없는 경우 비오는 날의 월 평균으로 대체할 수 있다. 다음과 같이 비가 올 확률은 비오는 날의 수에서 직접 산출된다.

$$PW=NWD/ND \quad (3)$$

여기서 PW는 비가 올 확률이고, NWD는 비가 온 날 수, ND는 한 달의 일수이다. 비가 오지 않은 날 다음에 비가 올 확률은 PW의 분획으로 산출된다.

$$P(W|D)=b1*PW \quad (4)$$

여기서 P(W|D)는 건조한 날 뒤에 비오는 날이 이어질 확률이며, b1는 보통 0.6~0.9 범위에 있는 분획이다. 비오는 날에 비오는 날이 이어질 확률은 다음 식을 사용하여 직접 산출할 수 있다.

$$P(W|W)=1.0-b1+P(W|D) \quad (5)$$

여기서 P(W|W)는 비가 온 다음에 비오는 날이 이어질 확률이다. b1=1.0일 때 비오는 날은 강우 확률에 영향을 미치지 않는다. 즉 P(W|D)=P(W|W)=PW이다. 반대로, 낮은 b1값은 비오는 날에 큰 영향을 미친다. b1=0.0, P(W|W)=1.0, P(W|D)=0. 따라서 b1는 강우사상 간의 간격을 통제하지만 비오는 날의 수에는 아무런 영향을 끼치지 않는다. 많은 지역에서 b1=0.75는 P(W|D)에 대한 만족스러운 예상치를 제공한다. 비록 식 4와 5는 강우 기록에서 예상된 수치와 어느 정도 상이한 확률을 제공할 수는 있지만 강우사상의 수에 대한 정확한 모델 구동을 보장한다.

공간 분포된 강우량(Spatially Distributed Rainfall)

공간적 강우 발생기는 더 큰 규모의 유역 또는 급격한 강우 증감률을 보이는 지역에 적용된다. 다음 식에 의해 설정된 규모의 유역 외부에 상자가 형성된다.

$$XSL=3.*(XCU-XCS) \tag{6}$$

여기서 XSL은 외부 상자의 x 스케일이고, XCU는 하위 영역 무게 중심의 최대 x 좌표이며 XCS는 하위 영역 무게 중심의 최소 x 좌표이다. Y 스케일인 YSL도 유사한 방식으로 계산된다. 따라서 남북 길이 방향의 지향성을 지닌 유역의 경우 상자는 XCU에서 동쪽으로 XCS에서 서쪽으로 유역의 너비만큼 확장되고, YCU에서 북쪽으로 YCS에서 남쪽으로 해당 유역의 길이에 해당하는 만큼 확장된다. 이러한 큰 크기는 생성된 강우 중심이 모든 하위 영역에 있어 완전하게 무작위로 일어나도록 보장한다(크기가 작을수록 유역의 중심 근처에 위치한 하위 영역에서 더 많은 강우 중심이 발생한다). 강우 중심은 다음 식에 의해 형성된다.

$$x=rnd*XSL+2.*XCS-XCU \tag{7}$$

여기서 x는 강우 중심의 x 좌표이고 rnd는 균등 임의의 수이다. 유사한 공식이 y값을 산출하는 데 사용된다. 강우 중심 강우량은 공식 1 또는 2를 통해 모델이 구동된다. 최대 10개의 관측소에 대한 월별 기상 발생기 매개변수가 이러한 관측소들이 대표하는 유역의 분획과 함께 입력될 수 있다. 이 분획은 누적 확률 분포를 형성하기 위해 사용된다. 강우가 발생할 때마다 한 세트의 기상 매개변수가 강우를 발생시키기 위해 누적 분포에서 무작위로 선택된다. 각 하위 영역에 해당하는 강우는 다음 식을 사용하여 산출한다.

$$RF(j)=NSA*RF*ZTP(j)*TDST/SUM \tag{8}$$

$$ZTP(j)=X2*(1.+BXCT*XCT(j))*(1.+BYCT*YCT(j)) \tag{8a}$$

$$X2=1.0-DUR^{-.1478}*D/(D+exp(2.291+0.00117*D)) \tag{8b}$$

$$D=sqrt((x-XCT(j))^2+(y-YCT(j))^2) \tag{8c}$$

여기서 RF는 강우 중심 강수량(mm)이며, NSA는 해당 유역의 하위 영역 숫자이며, XCT 및 YCT는 하위 영역의 중심점의 x 및 y 좌표이고, ZTP는 강우 지속기간, 하위 중심점과 강우 중심 간의 거리 및 강우 증감률을 설명하는 하위 영역에 대한 강우 유량 가중 인자이며, BXCT는 동쪽에서 서쪽으로 연간 강우 변화율(mm km⁻¹), BYCT는 남쪽에서 북쪽으로 연간 강우 변화율(mm km⁻¹), D는 하위 영역 및 강우 중심 간의 거리(km), DUR는 강우 지속 기간(h), TDST는 0.8~1.2 사이의 범위에 해당하는 삼각 분포에서 도출된 편차이다. SUM는 모든 하위 영역에 대한 ZTP의 합계이며, j는 하위 영역의 숫자이다. 식 8은 오랜 기간 지속되는 강우에 대한 더욱 넓은 분포도, 강우

중심에 근접한 하위 영역에 대한 더 높은 강우량, 강우 증감률 보정 및 임의의 구성요소를 제공한다. NSA와 SUM는 장기 평균 강우량을 유지하기 위해 ZTP 인자를 정상화하기 위해 사용된다.

2.1.2 기온 및 일사량(Air Temperature and Solar Radiation)

Richardson(1981)이 개발한 모델을 APEX 모델이 사용하고 있는데 이 모델은 강우와 상호 관련이 있는 기온 및 일사량을 모의하기 때문이다. 일일 최대 및 최소 기온과 잔여 일사량은 다변량 정규 분포를 통해 생성된다. 사용된 다변량 생성 모델은 최대 온도, 최소 온도 및 잔여 일사량이 정상적으로 분포되며 각 변수의 시계열 상관은 1차 선형 회귀 모델에 의해서 설명될 수 있다. 다변량 생성 모델에 대한 자세한 설명은 Richardson(1981)이 기술한 바 있으며, 1일 최대 온도, 최소 온도 및 태양 복사 의존 모델에 대해서도 Richardson(1982)이 설명한 바 있다.

온도 모델은 입력값으로 최대 및 최소 온도 및 표준 편차의 월별 평균치를 필요로 한다. 표준 편차를 구할 수 없을 경우 장기간 관찰을 통해 얻은 월별 최소 및 최대치로 대체할 수 있다. 이 모델은 표준 편차를 각 월에 대한 최대/최소 및 평균값 간에 0.25 차이가 나는 것으로 예측한다.

일사량 모델은 최대/최소 접근법만 사용하여 1일 일사량의 월별 평균치만 입력자료로 필요하다. 표준 편차를 예측하는 식은 다음과 같다.

$$SDRA=0.25*(RAMX-RA) \tag{9}$$

여기서 SDRA는 1일 일사량의 표준 편차($MJ\ m^{-2}$)이고, RAMX는 월 중순에 측정된 최대 1일 일사량, RA는 월별 평균 1일 일사량이다.

최대 온도 및 일사량은 보통 비오는 날에 더 낮은 경향이 있다. 따라서 비오는 날의 상태를 모의하기 위해서는 평균 최대 온도와 일사량을 하향 조정할 필요가 있다. TMX의 경우 비오는 날의 값이 건조한 날의 값보다 $TMX-TMN$ 의 일정 부분만큼 더 적다고 가정하여 구한다.

$$TWMX=TDMX-b2*(TMX-TMN) \tag{10}$$

여기서 TWMX는 비오는 날의 1일 평균 최대 온도($^{\circ}C$)이고, TDMX는 건조한 날의 1일 평균 최대 온도($^{\circ}C$)이고, b2는 0.0~1.0 범위의 계수 인자이며, TMX는 1일 평균 최대 온도, TMN은 1일 평균 최소 온도이다. b2=1.0를 선택할 경우 비오는 날에 가장 높은 편차가 발생하며, b2=0.0의 경우에는 비오는 날의 영향을 무시하도록 한다. 관찰된 데이터에 따르면 b2의 범위는 보통 0.5~1.0 이다.

식 10에서는 비오는 날에 더 낮은 평균 최대 온도를 가지기 때문에 건조한 날의 평균 최대 온도를 약간 증가시키기 위한 동반 방정식을 필요로 한다. 이는 연속 방정식에서 다음과 같이 직접 추출된다.

$$TMX*ND=TWMX*NWD+TDMX*NDD \quad (11)$$

여기서 ND는 1달의 일수이고, NWD는 비오는 날의 수, NDD는 건조한 날의 수이다. 원하는 식은 공식 10을 11로 대체하여 TDMX를 해결함으로써 얻을 수 있다.

$$TDMX=TMX+B2*(TMX-TMN)*NWD/ND \quad (12)$$

연속 방정식을 이용하면 장기간 모의된 평균 최대 온도 값이 TMX의 입력 값과 일치하도록 보장한다.

비오는 날과 건조한 날의 일사량을 조절하는 방법은 최대 온도를 조절하는 방법과 유사하다. 다음과 같이 비오는 날의 일사량은 건조한 날의 몇 분의 일 정도이다.

$$RAW=b3*RAD \quad (13)$$

여기서 RAW는 비오는 날의 일일 평균 일사량($MJ\ m^{-2}$), b3는 0.0~1.0 사이의 계수 인자이며, RAD는 건조한 날의 일일 평균 일사량이다. 많은 지역에서 0.5의 b3 값이 만족스러운 결과를 보인다. 건조한 날의 식은 식 11에서 일사량을 온도로 치환하고 식 13으로 RAW를 대체함으로써 발전된다. 그 후,

$$RAD=RA*ND/(b3*NWD+NDD) \quad (14)$$

여기서 RA는 일일 평균 일사량($MJ\ m^{-2}$)이다.

최대 가능한 일사량은 다음의 식에 의해 산출 가능하다.

$$RAMX=30.*DD*(H*YLS*\sin(SD)+YLC*\cos(SD)*\sin(H)) \quad (15)$$

$$DD=1.+0.0335*\sin((IDA+88.2)/58.13) \quad (15a)$$

$$SD=.4102*\sin((IDA-80.25)/58.13) \quad (15b)$$

$$CH=-\tan(YLAT/57.296)*\tan(SD) \quad (15c)$$

$$H=\cos(CH); -1.0<CH<1.0 \quad (15d)$$

$$H=0.0; CH>1.0 \quad (15e)$$

$$H=3.1416; CH<-1.0 \quad (15f)$$

$$YLS=\sin(YLAT/57.296) \quad (15g)$$

$$YLC=\cos(YLAT/57.296) \quad (15h)$$

여기서, YLAT는 해당 장소의 위도이고, SD는 태양의 평면각의 단위이고, IDA는 해당 년의 일수이다.

낮의 길이는 다음의 식에 의해 계산된다.

$$\text{HRLT}=7.72*\text{H} \quad (16)$$

여기서 HRLT는 시간 단위로 표현된 낮의 길이이다.

2.1.3 바람(Wind)

초기 EPIC 모델(Richardson과 Wright, 1984)은 평균 일일 풍속 및 일일 풍향을 모의하기 위해 사용되었다. 새로운 APEX 풍식 모델과 WECS(Wind Erosion Continuous Simulation) 모델은 해당 일의 풍속 분포도 및 우세 방향 등의 데이터를 필요로 한다. 일일 풍속 분포도는 다음의 수정된 지수 방정식을 사용하여 모의된다.

$$u_{10}=a_1*U_{10}*(-\ln(f))^{a_2} \quad (17)$$

여기서 u_{10} 은 해당 일의 f 분할시 풍속이며, U_{10} 은 해당일의 평균 풍속이며, a_1 와 a_2 는 매개변수이다. 식 17은 해당 일 동안의 시간의 함수로서 풍속이기 보다는 풍속 확률을 나타낸 것이라 할 수 있다. 풍속의 일일 시간 분포도는 필요하지 않는데 그 이유는 모든 APEX 모델의 구성 요소들이 일단위로 운영되기 때문이다. 텍사스의 Bushland와 Temple에서의 실험에 따르면 $0.1 < a_2 < 0.6$ 이다. 또한 a_2 값은 삼각 분포로부터 매일 생성되는데 기저값은 $0.1 \sim 0.6$ 이며 첨두값은 0.35 이다.

다음 식을 통해 a_1 값의 근사치를 구할 수 있다.

$$a_1=1.557*(a_2)^{0.1508}*\exp(-0.4336*a_2) \quad (18)$$

식 18은 평균 풍속 U_{10} 이 보존되게 한다. 여기서 u_{10} 값은 침식에 대한 임계 풍속에서 시작되는 f 와 함께 모의된다. 임계 $f(f_0)$ 값은 풍식 식 135와 식 17을 사용하여 다음과 같은 형태로 결정된다.

$$f_0=\exp((-u'/(0.0408*U_{10}))^{-a_2}) \quad (19)$$

여기서 u' 는 임계 마찰 속도($m\ s^{-1}$)이다. 여기서 f 값이 클수록 비부식성 풍속이 발생한다. f 가 감소할수록 u' 보다 큰 풍속이 발생한다. 평균 일일 풍속은 다음의 지수 방정식을 사용해 모의된다.

$$U_{10}=bw_1*U_{10}(mo)*(-\ln(rnd))^{bw_2} \quad (20)$$

여기서 $U_{10}(mo)$ 은 해당 월(mo)의 평균 풍속이고, rnd 는 임의의 수, bw_2 는 해당 월의 매개 변수이며, bw_1 는 식 18에서 설명한 것과 유사한 접근방법을 사용해 직접 산출된다. 텍사스의 Bushland와 Temple에서의 데이터를 통한 실험에 따르면 bw_2 은 약

0.3정도 이다.

시계방향으로 북쪽에서 평면각의 단위로 표시된 풍향은 각 지역에 특정한 실증적 분포도로부터 생성된다. 실증적 분포도는 풍향의 단순한 누적 확률 분포도를 말한다.

“미국 기후 감도(Climatic Atlas of the United States)” (미 상무부, 1968)는 16개의 방향에서 시작되는 바람의 월별 %를 제공한다. 따라서 어떤 날이든 상관없이 풍향을 예측하기 위해 이 모델은 균일하게 분포된 임의의 수를 뽑아 적절한 월간 누적 확률 분포도 상에서 그 위치를 찾아낸다.

2.1.3 상대습도(Relative Humidity)

상대습도 모델은 삼각 분포를 사용해 월간 평균에서 일간 평균 상대습도를 모의한다. 온도 및 복사량처럼 평균 일간 상대습도는 강우 효과를 설명하기 위해 조정된다. 비 오는 날과 건조한 날의 상대 습도 간의 가정된 관계는 다음과 같다.

$$RHW=RHD+bh1*(1.0-RHD) \quad (21)$$

여기서 RHW는 비 오는 날의 일간 평균 상대습도이고, RHD는 건조한 날의 일간 평균 상대습도, bh1는 0.0~1.0 사이의 계수 인자이다. 많은 지역에서 0.9의 bh1 값이 적절하였다. ‘온도 및 복사량’ 부분에서 설명한 것처럼 연속 방정식을 사용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$RHD=(RH(mo)-bh1*NWD/ND)/(1.0-bh1*NWD/ND) \quad (22)$$

여기서 RH는 해당 월에 대한 장기 평균 상대습도를 말한다.

적절한 값(RHW 또는 RHD)은 일간 상대습도를 발생시키기 위한 삼각 분포의 첨두값으로 사용된다. 삼각 분포의 상한치는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$RHU=RHP+(1.0-RHP)*exp(RHP-1.0) \quad (23)$$

여기서 RHU는 해당 일에 생성될 수 있는 가장 큰 상대습도이고, RHP는 삼각 분포의 첨두값이다 (RHW 또는 RHD). 하한치는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$RHL=RHP*(1.0-exp(-RHP)) \quad (24)$$

여기서 RHL은 해당 일에 생성될 수 있는 최저 상대습도 값이다. 장기간 모의된 평균 상대습도 값이 입력값 RH와 일치하도록 하기 위해서 생성된 값은 다음의 식에 의해 조정된다.

$$RHG'=RHG*RHP/RH \quad (25)$$

여기서 RHG'는 생성된 상대습도로서 삼각형의 평균치로 조정된 값이고 RHG는 삼각형에서 생성된 상대습도이며 RH는 삼각형의 평균치이다.

상대습도 데이터를 구할 수 없을 경우 이슬점 온도로 대체 가능하며, AEPX 모델은 식 93i와 93j를 사용하여 월별 평균 상대습도를 예측한다. 이슬점 온도를 이용할 수 없을 경우 APEX 모델은 다음의 식을 사용하여 월별 평균 상대습도를 예측한다.

$$RH=0.9-0.8*X1/(X1+\exp(5.12-0.127*X1)) \quad (26)$$

$$X1=TMX-TMN \quad (26a)$$

여기서 TMX와 TMN은 월별 평균값(°C)이다. 식 26은 ‘상대습도는 온도 변화와 반비례하게 변한다’는 가정 하에 얻어졌다(Hargreaves와 Samani, 1985).

2.2 수문(Hydrology)

2.2.1 강우 차단(Rainfall Interception)

식물 캐노피에 의한 강우 차단은 다음의 식에 의해 예측 가능하다.

$$RFI=RIMX*(1.0-\exp(-bi*\sqrt{TAGP*SMLA})) \quad (27)$$

여기서 RFI는 차단된 강우(mm)이며, RIMX는 한번에 최대 차단 가능한 강우(mm)이며, TAGP는 지표 작물(t ha⁻¹)이며, SMLA는 해당 작황의 엽면적 지수, bi는 정수(대략 0.1)이다. 식 27은 농경지, 목초지, 방목장 및 삼림지 등 다양한 용도의 토지에 사용되기 위해 구성되었다. 강우가 차단된 양을 초과하는 경우 초과된 양이 토양 표면으로 떨어지게 된다.

$$RFV=RF-RFI \quad (28)$$

여기서 RFV는 토양 표면에 도달하는 강우량(mm)이다.

2.2.2 지표 유출수(Surface Runoff)

유출수 모델은 주어진 일일 강우량에 따라 표면 유출수량과 최대 유출률을 모의한다. 유출량을 예측하기 위해 2가지 방법이 제시되는데, 하나는 SCS(Soil Conservation Service) 유출 곡선 지수의 변형된 버전이고 다른 하나는 Green-Ampt 침투식(Green과 Ampt, 1911)이다. 유출 곡선 지수 기법을 선택하는 이유는 이 방법이 신뢰할 만한 방법으로 미국에서 오랫동안 사용되어 왔으며 산출시 매우 효율적이고 일반적으로 구할 수 있는 입력값을 사용하며 유출수를 토양의 유형, 토지의 용도 및 관리 기법과 관련시키기 때문이다. 쉽게 이용 가능한 일일 강우 데이터를 사용하는 점은 유출 곡선 지수의 매우 중요한 속성으로 많은 지역에 하루보다 더 짧은 단위를 가진 강우 데이터를 얻는 것은 불가능하기 때문이다. 또한 강우 데이터의 이용 및

강수량 산출은 일일 단위로 산출된 데이터가 더 짧은 시간 간격의 데이터보다 효율적이기 때문이다. 유출 곡선 지수의 중요한 단점은 강우의 강도를 설명하지 못하는 것이다. 따라서 Green-Ampt 방법이 옵션으로 제시된다. 일별 강우는 Green-Ampt에 필요한 강우율을 제공하기 위해 확률적으로 생성된 매개변수와 함께 기하급수적으로 분산된다.

최대 유출률을 예측하는 데는 2가지 선택이 가능하다. 하나는 수정된 유리 방정식이며 다른 하나는 SCS TR-55 법이다(USDA-SCS, 1986). 오직 주어진 일일 강우 및 월별 강우 강도에만 근거해서 최대 유출률의 현실적인 모의 결과를 제공하기 위하여 확률적 요소를 유리 방정식에 포함한다.

유출량(Runoff Volume)

유출 곡선법 (SCS Curve Number Method)

SCS 유출 곡선식을 이용하여 일일 강우량으로부터 표면 유출량을 예측한다(USDA, Soil Conservation Service 1972).

$$Q=(RFV-0.2*s)^2/(RFV+0.8*s); \quad RFV>0.2*s \quad (29)$$

$$Q= 0.0; \quad RFV<0.2*s$$

여기서 Q는 일일 유출수이고, RFV는 일일 강우, s는 토양수분 저류 가능량 ("표기법" 섹션을 참조). 토양수분 저류 가능량인 s는 토양, 토지의 용도, 관리 및 경사도가 모두 변하고 시간에 따라 토양의 수분 함량이 변하기 때문에 변한다. 이 매개변수 s는 SCS 식에 의해 곡선지수(CN)와 관련이 있다(USDA, Soil Conservation Service, 1972).

$$s=254.*(100./CN-1.) \quad (30)$$

식 30에서 정수 254는 inch와 mm의 보정값이다. 따라서 RFV 및 Q는 mm 단위로 표현된다. 수분조건 2에 대한 곡선 지수 또는 평균 곡선 지수, CN₂는 SCS 수문학 지침서를 사용하여 어떤 지역이든지 상관없이 쉽게 얻을 수 있다(USDA, Soil Conservation Service, 1972). 이 지침서에서는 토양, 토지의 이용 및 관리 등의 요소를 고려한다. 이 안내서의 CN₂ 값이 5%의 경사도에 적절하다는 가정 하에 다른 경사도에 대한 값을 조절하기 위한 다음의 식을 개발하였다.

$$s_{2S}=s_2*(1.1-STP/(STP+exp(3.7+0.02117*STP))) \quad (31)$$

여기서 s_{2S}는 경사도에 따라 조정된 CN₂와 관련된 유지 매개변수며 STP는 해당 지역의 평균 경사도이다. CN₁ 값, 함수조건 1(건조)에 대한 유출 곡선 지수, CN₂에 상응하는 CN₃(습윤) 값도 또한 안내서에 표로 제시되어 있다. 계산 과정에서 CN₁ 및 CN₃은 다음 식을 통해 CN₂와 관련되어 있다.

$$CN_1=CN_{2S}-20.*C_2/(C_2+exp(2.533-0.0636*C_2)) \quad (32)$$

$$CN_3 = CN_{2s} * \exp(0.00673 * C_2) \quad (33)$$

$$C_2 = 100. - CN_{2s} \quad (33a)$$

유지 매개변수는 시간에 따라 변화하는데 주된 이유는 토양 수분 함량의 변화 때문이다. 과거 수문학자들은 기존의 강우량에 기반해 유지 매개변수를 예측했다(USDA, Soil Conservation Service, 1972). CREAMS 모델(Knisel, 1980)은 다음의 선형 방정식을 사용하여 s를 토양 수분 함량에 직접 관련시켰다.

$$s = s_1 * (1.0 - FFC) \quad (34)$$

여기서 s_1 는 CN_1 과 관련된 값이며, FFC는 포장용수량의 분획이다. FFC는 다음의 식에 의해 산출된다.

$$FFC = (ST - WP) / (FC - WP) \quad (34a)$$

여기서 ST는 뿌리층의 토양 수분 함량이고, WP는 위조점의 토양 수분 함량(대부분의 토양이 1,500 kPa), FC는 포장용수량의 수분 함량(많은 토양의 경우 33 kPa)이다. 식 34는 위조점에서 s_1 값으로 시작해 포장용수량에서 0.0이기 때문에 모든 토양에서 사용하기에 충분하지 않은 것으로 밝혀졌다. 왜냐하면 $s=0.0$ 는 $CN=100$ 인데 이는 모래와 같은 토양에서 지나치게 높은 수준이기 때문이다. EPIC(1984) 모델은 비선형 s-토양 수분 방정식으로 도입하였다.

$$s = s_1 * (1.0 - FFC / (FFC + \exp(w_1 - w_2 * FFC))) \quad (34b)$$

$FCC=0.6$ 일 때 $s=s_2$, $(ST-FC)/(PO-FC)=0.5$ 일 때 $s=s_3$ 라는 가정 하에 식 34b에서 w_1 와 w_2 값을 구할 수 있다.

$$w_1 = X_1 + 60. * w_2 \quad (35)$$

$$w_2 = (X_1 - X_2) / (POFC - 60.) \quad (36)$$

$$X_1 = \ln(60. / (1.0 - s_2 / s_1) - 60.) \quad (37)$$

$$X_2 = \ln(POFC / (1.0 - s_3 / s_1) - POFC) \quad (37a)$$

$$POFC = 100. + 50. * X_3 / X_4 \quad (37b)$$

$$X_3 = \sum (PO(1) - WP(1)), l=1, M \quad (37c)$$

$$X_4 = \sum (FC(1) - WP(1)), l=1, M \quad (37d)$$

여기서 s_3 은 CN_3 유지 매개변수이고, PO는 토양층 1의 다공성, M는 토양층의 수를 의미한다. 식 36과 37은 CN_1 이 위조점과 일치하고 유출 곡선 지수는 100을 초과하지 않도록 한다.

식 34a에서 얻은 FFC 값은 토양 상층부의 1.0 m까지 일정하게 분포된 토양수를 나타낸다. 예측된 유출수 값은 토양수의 깊이별 분포값을 알 수 있을 경우에 향상될 수 있다. 예를 들어 토양수 깊이별 분포값의 감소(토양 표면에 더 많은 수분 존재)는 일정한 분포도보다 더 많은 유출수를 생산한다. 반대로 일정한 토양수 깊이별 분포값은 토양수 깊이 분포도가 증가할 때보다 더 많은 유출수를 발생시킨다(낮은 토양층에 더 많은 수분 존재). APEX 모델은 각 토양층의 수분 함량을 매일 예측하기 때문에 토양 깊이별 분포값을 이용할 수 있다. 유출수에 대한 토양 깊이별 분포값의 영향력은 토양 깊이별 가중 함수를 통해 표현될 수 있다.

$$FFC' = X1/X2 \quad (38)$$

$$X1 = \sum(FFC(1) * X2) \quad (38a)$$

$$X2 = \sum((Z(1) - Z(1-1)) / Z(1)); \quad l=1, M \quad (38b)$$

$$Z(1) < 1.0m \quad (38c)$$

여기서 FFC'는 식 34b에서 사용하기 위한 토양 깊이 가중 FFC 값이고, Z는 토양층 바닥까지의 깊이(m)이다. 식 38은 이 두 가지 역할을 수행한다. 첫째로 FFC(1)은 Z(1)로 나눈 값이기 때문에 낮은 층의 영향력을 감소시키고, 둘째로 FFC(1)은 층 두께만큼 곱한 값이기 때문에 얇은 층보다 두꺼운 층에 적절한 가중치를 준다.

APEX 모델은 일별 CN 값을 예측하기 위해 총 5가지 방법을 제시하는데, 이 중 3가지는 앞에서 설명되었고, 다른 하나는 정적 유출 곡선 지수이고(가축 사육장 같은 곳에서 유용함)와 토양수 지표(SWI) 기법이다. SWI 기법은 일일 수분 산출량 모델에서 소개되었다(Williams와 Laseur, 1976). 이 기법은 약간의 변형을 거쳐 APEX 모델에 포함되었다. 다음의 식을 통해 s는 매개변수 설정에 따라 0.0 ~ S1 또는 그 보다 더 큰 값 사이에서 추출된다.

$$s = s_0 + PET * \exp(-P_{42} * s_0 / s1) - RFV + Q \quad (38d)$$

$$s < P_{44} * s1 \quad (38e)$$

여기서 s₀는 전날의 토양수분 저류 가능량, PET는 잠재적인 증발산량이다. 식 38d는 PET가 높고 s₀가 낮을 때 s를 빠르게 증가시킨다(습윤 조건). SWI 법은 s를 토양수와 직접 연결시키는 방법들과 비교해 볼 때 2가지의 분명한 이점을 가진다. 첫째는 2가지 매개변수 P₄₂와 P₄₄가 측정하기 편리하다는 것이고, 둘째는 중복 계산이 존재하기 때문에 낮은 토양수 저류 용량을 가진 토양(얕거나 거친 질감의 토양)이 직접 연결 방법에서는 큰 문제가 되기도 한다. 보통 이런 낮은 저류 용량의 토양은 낮은 기저 CN₂ 값을 갖는데, 낮은 저류 용량 때문에 대부분의 시간을 건조한 상태에 머무르는

경향을 보인다. 따라서 유출수는 실제보다 낮게 예측된다.

또한 본 모델은 동결된 토양에서 유출수를 예측하기 위한 항목이 포함된다. 두번째 토양층의 온도가 0.0°C 이하이면, 토양수분 저류 가능량은 다음의 식을 통하여 감소된다.

$$s' = 0.1*s \quad (39)$$

여기서 s' 는 동결된 땅에 대한 토양수분 저류 가능량이다. 식 39는 동결된 토양에서 유출수를 증가시키지만 토양이 건조될 때 심각한 침투 현상이 발생하도록 한다.

유출수 용량을 예측하는 마지막 단계는 불확실성을 설명하고자 하는 것이다. 유지 매개변수 또는 유출 곡선 지수(CN) 예측치는 토지의 사용, 관리, 수문학적 토양 그룹, 땅의 경사, 토양수 함량 및 분배에 기반하여 얻을 수 있고 동결된 토양의 경우 조정된다. 그러나 이 모델은 유출량에 영향을 미치는 많은 복잡한 자연적인 과정과 인공 수로 등을 설명하지 못하고 있다. 따라서 최종 유출 곡선 지수 예측치는 이러한 불확실한 변화를 설명하기 위해 삼각분포에서 생성된다. 삼각형의 평균치가 식 30, 31, 34, 38 및 39에 근거해서 얻은 곡선 지수 예측치이다. 이 예측치의 불확실성은 양수이든 음수이든 상관없이 유출 곡선 지수 5 정도의 범위에 있는 것으로 가정된다. 따라서 삼각 분포의 극치는 평균치에서부터 ± 5 정도 차이가 나는 유출 곡선 지수값으로 설정된다. 이렇게 생성된 유출 곡선 지수는 식 29를 통해 유출량을 예측하기 위해 식 30으로 대체된다.

Green-Ampt 법

Green-Ampt 침투식은 유출량을 예측하기 위한 한 방법이다. 유출 곡선 지수 방식과 토양의 특성과 관리 측면과의 관계를 이용하기 위해 초기의 방정식을 수정하였다. 수정된 식은 다음과 같다.

$$f = \text{SATK} * (s / (\text{FT} + 1.)) \quad (40)$$

여기서 f 는 침투율(mm h^{-1})이고, SATK 는 토양의 포화 수리 전도도(mm h^{-1}), s 는 강우 시작 시 유출곡선지수(CN) 기반 토양수분 저류 가능량, FT 는 축적된 침투량(mm)이다. 강우에 대한 유출량은 증가하는 예상치를 합산하여 계산한다.

$$Q = \text{sum}(dt * (r - f)) \quad (41)$$

여기서 dt 는 시간 간격(h)이고, r 은 강우율(mm h^{-1})이다.

개별 강우율은 CLIGEN(Nicks와 Lane, 1989)에 얻어낸 지수 분포도를 이용하여 생성된다.

$$r = r_p * (1. - (\text{RTP} - \text{sum}(r * dt)) / \text{XKP}_1); 0 < t < t_p \quad (42)$$

$$r=r_p*(1.-(\text{sum}(r*dt)-\text{RTP})/XKP_2); t_p<t<\text{DUR} \quad (43)$$

여기서 r_p 는 침투 강우율(mm h^{-1})이고, t_p 는 침투 강우량에 도달하기까지의 시간(h), RTP는 t_p 에서의 강우량(mm), DUR은 강우 지속 시간 (h), XKP_1 와 XKP_2 는 지수 상수(h)이다. 이 변수들은 무차원 분포도를 고려하여 결정된다. 지속시간(t_{pu})의 분율로서 침투값 도달 시간은 하한값 0.05, 최대값 0.25, 상한값 0.95를 가진 삼각 분포를 통해 생성된다. 정수 XKP_1 와 XKP_2 는 $0.01<r/r_p<1.0$ 범위 내에서 다음의 무차원 지수 방정식의 해를 구함으로써 결정된다.

$$r=r_p*\exp((t-t_{pu})/XK_1); 0<t<t_{pu} \quad (44)$$

$$r=r_p*\exp((t_{pu}-t)/XK_2); t_{pu}<t<\text{DUR} \quad (45)$$

$$XK_1=t_{pu}/4.605 \quad (46)$$

$$XK_2=(1.-t_{pu})/4.605 \quad (47)$$

지속 시간은 무차원 분포도를 통합하고 해당 강우에 대한 강우량으로 나눔으로써 산출된다.

$$\text{DUR}=\text{RFV}/(r_p*(XK_1+XK_2)) \quad (48)$$

마침내 강우 매개변수 XKP_1 와 XKP_2 를 이용할 수 있게 된다.

$$XKP_1=XK_1*\text{DUR} \quad (49)$$

$$XKP_2=XK_2*\text{DUR} \quad (50)$$

r_p 값은 ‘물에 의한 침식’ 부분에서 논의한 방식으로 얻어지고, RTP는 RFV와 t_{pu} 를 곱한 값이다.

침투 유출률(Peak Runoff Rate)

APEX 모델은 최대 유출률을 예측하기 위한 두 가지 방법을 포함하는데, 첫째는 수정된 유리 방정식이고 둘째는 SCS TR-55법(USDA-SCS, 1986)이다.

유리 방정식(Rational Equation Method)

유리방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_p=bq*r*WSA/360. \quad (51)$$

여기서 q_p 는 침투 유출률($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), bq 는 유역 침투 특성을 나타내는 유출 계수, r 는 유역의 도달 시간 동안의 강우 강도(mm h^{-1}), WSA는 유역 면적(ha)이다. 다음과 같이 강우 및 유출량을 알고 있을 경우 각 강우에 대한 유출 계수를 산출할 수 있다.

$$bq=Q/RFV \quad (52)$$

RFV가 투입되고 Q가 식 29와 41을 통해 산출되기 때문에 bq를 직접 계산할 수 있다. 강우 강도는 다음 관계로 표현될 수 있다.

$$r=RFV_{TC}/TC \quad (53)$$

여기서 RFV_{TC} 는 유역의 도달 시간(TC, h)동안의 강우량(mm)이다. RFV_{TC} 값은 총 RFV와의 관계를 발전시켜 예측 가능하다. Weather Service의 TP - 40(Hershfield, 1961)은 다양한 지속기간 및 주기에 따른 누적 강우량 정보를 제공한다. 일반적으로 RFV_{TC} 와 RFV_{24} (24시간의 지속 시간이 일 단위로 운영되는 모델에 적합함)는 다양한 주기에 비례한다. 따라서 다음과 같다.

$$RFV_{TC}=alp*RFV_{24} \quad (54)$$

여기서 alp는 총 강우량 대비 TC의 비율을 표현하는 무차원 매개변수이다.

다음과 같이 최대 유출량 식은 식 52, 53와 54를 식 51로 대체함으로써 구할 수 있다.

$$q_p=alp*Q*WSA/(360.*TC) \quad (55)$$

도달 시간은 지표면 및 수로 유동 시간을 추가함으로써 다음과 같이 예측 가능하다.

$$TC=TC_c+TC_s \quad (56)$$

여기서 TC_c 는 수로 유동(channel flow)의 도달 시간이고 TC_s 는 지표 유동(surface flow)의 도달 시간이며 시간 단위로 표현된다. TC_c 는 다음 식으로 통해 산출될 수 있다.

$$TC_c=L_c/VCH \quad (57)$$

여기서 L_c 는 해당 유역의 평균 수로 유동 길이(km)이고, VCH 는 평균 수로 속도($m\ s^{-1}$)이다. 평균 수로 유동 길이는 다음의 식을 통해 예측 가능하다.

$$L_c=sqrt(L*L_{CA}) \quad (58)$$

여기서 L는 가장 먼 지점에서 유역 출구까지의 수로 길이(km)이고, L_{CA} 는 수로쪽 출구에서 유역의 중심점까지의 거리(km)를 말한다. 평균 속도는 Manning 식을 사용하고 2:1 비탈 및 10:1 바닥 폭/깊이 비율을 가진 사다리꼴 수로를 가정함으로써 예측 가능하다.

$$TC_c=sqrt(L*L_{CA}*n^{0.75}/(0.489*q_c^{0.25}*CHS^{0.375})) \quad (59)$$

여기서 n은 Manning 식의 n이고, q_c 는 평균 유동 속도($m^3\ s^{-1}$), CHS는 평균 수로 경사($m\ m^{-1}$)이다. $L_{CA}=0.5L$ 를 가정하고 단위 변환을 통해(L의 경우 m을 km로, TC_c 의

경우 초에서 시간으로, q_c 의 경우 $m^3 s^{-1}$ 에서 mm 변환) 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$TC_C = 1.75 * L * n^{0.75} / (WSA^{0.125} * CHS^{0.375}) \quad (60)$$

평균 유동 속도 q_c' ($mm h^{-1}$)는 해당 지역의 단위 수원에서 얻은 평균 유하속도 예상치와 다음 관계를 통해 얻을 수 있다.

$$q_c' = q_{c1} / \sqrt{WSA} \quad (61)$$

여기서 q_{c1} 는 1 ha 면적의 평균 유동률($mm h^{-1}$)이다. 단위 수원의 유동률은 다음의 식을 통해 예측할 수 있다.

$$q_{c1} = Q / DUR \quad (62)$$

여기서 시간을 단위로 표현된 강우 지속시간인 DUR은 다음의 식을 통해 산출된다.

$$DUR = -4.605 / (2 * \ln(1 - \alpha p_{.5})) \quad (63)$$

여기서 RFV_{TC} 대신 $RFV_{.5}$ 을 사용하여 식 54를 통해 산출된다. 식 63은 강우 강도가 기하 급수적으로 분산된다는 가정에서 파생한다. $\alpha p_{.5}$ 와 DUR을 예측하는 절차에 대한 내용은 ‘물에 의한 침식’ 부분에서 자세히 다루도록 한다.

식 62를 식 60으로 대체하여 다음과 같이 TC_C 를 구하기 위한 최종 공식을 얻을 수 있다.

$$TC_C = 1.75 * L * n^{0.75} / (q_{c1}^{0.25} * WSA^{0.125} * CHS^{0.375}) \quad (64)$$

비슷한 접근방법이 TC_S 예측치를 구하기 위해 이용된다.

$$TC_S = SPLG / OFV \quad (65)$$

여기서 SPLG는 고지대 경사 길이(m)이고, OFV는 육로 유동 속도($m s^{-1}$)이다. Manning 식을 1m 폭과 경사 길이까지 내려온 땅에 적용하고 유동이 1:1의 측면 경사도와 5:1의 바닥 폭-깊이비를 가진 사다리꼴 수로에 집중된다는 가정에 따라 다음과 같은 속도 공식을 얻을 수 있다.

$$OFV = 0.8375 * d^{0.667} * STP^{0.5} / n \quad (66)$$

여기서 d는 유동 깊이(m), n은 유속의 함수로서 Manning의 조도 계수이다. 평균 유동 깊이 d는 유동률의 함수로서 Manning 식을 통해 산출가능하다.

$$d = (q_o * n)^{0.375} / (5.025 * STP^{0.5}) \quad (67)$$

여기서 q_o 는 평균 유동률($m^3 s^{-1}$)이다. 식 66과 67을 식 65로 대체하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$TC_S = 0.0216 * (SPLG * n)^{0.75} / (q_{c1}^{0.25} * STP^{0.375}) \quad (68)$$

적절하게 alp를 평가하기 위해서는 강우 패턴의 변화를 반드시 고려해야 한다. 단기 강우의 경우 거의 모든 강우는 TC동안 일어나 alp가 상한치인 1.0에 도달하게 된다. 일정한 강도로 일어나는 다른 강우의 경우 alp가 최소값에 접근하도록 한다. 기타 모든 패턴은 균일한 패턴의 경우보다 더 높은 alp값을 갖게 되는데 이는 TC 강우율이 더 크기 때문이다. 강도와 시간을 곱한 값을 식 54로 대체함으로써 alp의 최소값인 alp_{mn}을 구하기 위한 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$alp_{mn}=TC/24. \quad (69)$$

따라서 alp는 다음 범위로 제한된다.

$$alp_{mn}<alp<1. \quad (69a)$$

범위가 제한되어 있기 하지만 alp값은 일일 강우 및 모의된 유출량만이 주어질 경우 상당한 불확실성을 보인다. 따라서 alp는 TC/24에서 1.0에 이르는 기저값을 가진 삼각분포에서 발생된다. 침투 alp 분포값은 강우 강도가 계절에 따라 달라지기 때문에 매달 변화한다. Weather Service(U.S. Department of Commerce, 1979)에서는 매달 침투 alp값을 예측하기 위해 사용될 수 있는 월별 최대 강우 강도에 대한 정보를 제공한다.

TR-55법

침투 유출률을 예측하는데 사용되는 SCS TR-55법에 대한 내용은 USDA - SCS (1986)에서 자세히 다루었다. 여기서는 필수 공식만을 살펴보도록 하는데 다음 식에서 표현한대로 침투 유출률은 강우분포와 강우량, 유출 곡선 지수, 도달 시간에 달려있다.

$$q_p=q_p' *RFV \quad (70)$$

여기서 q_p 는 침투율($mm\ h^{-1}$), q_p' 는 강우 단위별 침투율(h^{-1}), RFV는 강우량(mm)을 말한다. 주어진 강우 분포(SCS Type I, IA, II, or III), 유출 곡선 지수 및 유역의 도달 시간에 기반해 q_p' 를 예측하기 위해 일련의 곡선을 이용 가능하다(USDA-SCS, 1986). 적절한 강우 유형을 결정하기 위한 미국 지도가 제공된다(USDA-SCS, 1986). q_p' , TC와 CN과 관련된 곡선이 7차 다항식과 함께 컴퓨터 솔루션에서 사용하기 위해 제공된다.

도달 시간은 다음 공식을 통해 예측가능하다.

$$TC=TC_C+TC_S+TC_{SF} \quad (71)$$

여기서 TC는 해당 유역의 도달 시간(h), TC_C , TC_S 와 TC_{SF} 는 수로 유동, 지표면 유동과 얇은 수로 유동에 기인한 TC 구성요소이다. 수로의 구성요소는 다음의 식을 통해

산출된다.

$$TC_c = (CHL - SPLG - SFL) * n / (3.6 * d^{0.667} * CHS^{0.5}) \quad (72)$$

여기서 TC_c 는 수로의 도달 시간(h), CHL은 가장 먼 지점에서 유역 출구까지의 수로 길이(km), SPLG는 고지대 경사 길이(km), SFL은 얇은 유동 길이(km), n는 Manning의 조도 계수, d는 평균 수로 유동 깊이(m), CHS는 수로 경사도($m \ m^{-1}$)이다. TC는 얇은 유동 구성 요소는 다음의 식을 통해 산정할 수 있다.

$$TC_{SF} = SFL / SFV \quad (73)$$

여기서 SFV는 평균 얇은 유동 속도($km \ h^{-1}$)는 다음의 식을 통해 산정할 수 있다.

$$SFV = 17.7 * STP^{0.5}; \ SFV < 2.19 \ km \ h^{-1} \quad (74)$$

여기서 STP는 표면 유동 경사도($m \ m^{-1}$)이다. 얇은 유하 길이인 SFL은 다음의 식을 통해 산정할 수 있다.

$$SFL = 0.05; \ L > 0.1 \ km \quad (75)$$

$$SFL = L - 0.05; \ 0.05 < L < 0.1 \ km \quad (75a)$$

$$SFL = 0.0; \ L < 0.05 \ km \quad (75b)$$

유의할 점은 $S = 0.001$ 일 경우에도 TC_{SF} 은 0.1시간 이하로 제약된다는 점이다. 따라서 TC_{SF} 는 일반적으로 미미한 수준이다. TC의 표면 유하 구성요소는 다음의 식을 통해 산정된다.

$$TC_S = 0.0913 * (SPLG * n)^{0.8} / (STP^{0.4} * RFV^{0.5}) \quad (76)$$

2.2.3 지표아래 유동(Subsurface Flow)

지표아래 유동 모델은 수직 및 수평적 구성 요소를 포함한다. 수직 및 수평적 지표아래 유출은 저류 추적 및 관내 유동 방정식을 사용해 동시에 산출된다. 수직 또는 삼투 구성요소는 지하수 저류지로 흐르고 시스템 내 깊은 삼투작용 및 복귀류의 영향을 받는다. 복귀류는 모델 하위영역에서 수로 유동으로 추가된다. 수평적 유동은 측면 및 빠른 복귀류로 나누어진다. 측면 지표아래 유동은 강 하류의 하위 영역에 신속하게 진입하여 해당 하위 영역의 토양수 저류지에 추가된다. 빠른 복귀류는 하위영역에서 시작된 수로 유동에 추가된다.

저류 추적 기법은 토양수 함량이 포장용수량을 초과할 때 토양층 내에서의 유동을 가능하게 한다. 저류지가 포장용수량 수준으로 회복될 때까지 토양층 저류 및 포화 전도도의 작용을 통해 물이 해당 층에서 배수된다. 토양수의 감소는 다음의 추적 방정식을 통해 모의된다.

$$ST(1)=(STo(1)-FC(1))*exp(-dt/TT(1))+FC(1) \quad (77)$$

여기서 ST와 STo는 구간 dt(24 h)의 처음과 마지막 순간의 토양수 함량이고, TT는 층 1로의 이동시간(h)이다. FC는 포장용수량(mm)이다.

따라서 일일 유동률은 ST 및 STo간의 차이를 고려하여 산출된다.

$$O(1)=(ST(1)-FC(1))*(1.-exp(-24./TT(1))) \quad (78)$$

여기서 O는 층 1의 유동률(mm d⁻¹)이다.

한 층으로의 이동 시간은 다음과 같은 1차 저류 방정식을 통해 산출된다.

$$TT(1)=(PO(1)-FC(1))/SC(1) \quad (79)$$

여기서 PO는 다공성(mm), FC는 포장용수량(mm), SC는 포화전도도(mm h⁻¹)이다. 수직 및 수평 유동은 다음의 식을 통해 구분된다.

$$QV(1)+QH(1)=(ST(1)-FC(1))*X3; ST(1)>FC(1) \quad (80)$$

$$X3=1.-exp(-24./TTv(1))*exp(-24./TTH(1)) \quad (80a)$$

여기서 QV는 수직 유동 또는 삼투율(mm d⁻¹)이며, QH는 수평 유동 또는 측면 지표아래 유동(mm d⁻¹), TTv는 수직 이동 시간(h), TTh는 수평 이동 시간(h), 첨자 1은 토양층 수이다. 수직 이동 시간은 식 79으로 산출되고 수평 이동 시간은 다음의 식으로 산출된다.

$$TTh(1)=HST(1)/HCL(1) \quad (81)$$

여기서 HST는 토양수 저류량(mm), HCL은 수평 포화 유동률(mm h⁻¹)이다. 수평 포화 유동률은 다음의 식으로 산출된다.

$$HCL(1)=SC(1)*STP \quad (82)$$

여기서 STP는 경사면(m m⁻¹)이다. 수평 저류량은 다음의 식으로 산출된다.

$$ST(1)=(PO(1)-FC(1))*0.5*SPLG/DZ \quad (83)$$

여기서 SPLG는 경사면 길이(m)이고, DZ는 토양층 두께(m)이다. 경사면의 중심에서 출구까지의 이동 시간을 계산하는 것이기 때문에 경사면의 절반만을 고려한다. QH/QV 비를 얻고 그 결과로 얻어지는 QH값을 식 80으로 대체하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$QV(1)+QV(1)*X2/X1=(ST(1)-FC(1))*X3 \quad (84)$$

$$X1=1.-exp(-24./TTv(1)) \quad (84a)$$

$$X2=1.-exp(-24./TTh(1)) \quad (84b)$$

QV를 구함으로써 다음과 같은 최종 침투 공식을 얻을 수 있다.

$$QV(1)=(ST(1)-FC(1))*X3/(1.+X2/X1) \quad (85)$$

측면 유동은 다음의 식을 사용하여 인접한 하류쪽 하위영역으로 빠른 복귀류와 표면 유동으로 나뉘게 된다.

$$SSF(1)=0.001*(ST(1)-FC(1)-QV(1))*SPLG/RCHL \quad (86)$$

$$QRF(1)=ST(1)-FC(1)-QV(1)-SSF(1) \quad (87)$$

여기서 QRF는 빠른 복귀류(mm d⁻¹), SSF는 지표아래 유동률(mm d⁻¹), RCHL은 하도구간의 수로 길이(km)이다. SPLG/RCHL 비율이 1.0에 도달하면서(매우 작은 규모의 산지 사면 유역) 모든 지표아래 유동은 지하에 남아있게 되고 인접한 하위영역 토양수 저류지로 진입한다. 반대로 이 비율이 0.0에 근접하게 되면 모든 지표아래 유동은 빠른 복귀류로 다시 표면으로 부상하게 된다.

관내 유동은 산림 유역에서 흔히 볼 수 있으며 빠른 수직 및 수평 유동을 적절하게 설명하기 위해 반드시 모의되어야 한다. 부패된 뿌리, 동물 등에 의해 형성된 파이프를 통해 이루어지는 유동은 저류 추적에는 포함되지 않는다. 토양층까지 통과하는 수직 관내 유동은 유입류의 분획으로서 다음의 식으로 산정된다.

$$CPVV(1)=CPRV(1)*QI(1) \quad (88)$$

여기서 CPVV는 수직 관내 유동률(mm d⁻¹), CPRV는 수직 관내 유동으로 할당된 유입량의 분획이며, QI는 유입률(mm d⁻¹)이며, 1는 토양층 수이다. 수평 관내 유동은 비슷한 식을 통해 산정된다.

$$CPVH(1)=CPRH(1)*(I(1)-CPVV(1)) \quad (89)$$

여기서 CPVH는 수평 관내 유동률(mm d⁻¹)이며 CPRH는 수평 관내 유동으로 분할된 유입류의 분획이다. CPRH는 빠른 복귀류로 더해진다. 동작 순서는 식 88, 89, 80에서 87이다.

추적 과정은 토양 표면층에서부터 시작해 가장 깊은 층까지 적용된다. 일부 층의 포화전도도가 다른 층보다 훨씬 낮을 수 있기 때문에 이러한 추적 방식은 포화전도도가 낮은 층의 다공성 수준이 초과될 수도 있는 불가능한 상황이 초래될 수 있다. 이러한 이유 때문에 백패스(back pass)가 바닥층에서부터 표면까지 시행된다. 한 층의 다공성이 초과될 경우 초과된 수분은 위층으로 이동된다. 이러한 과정은 최상위 층까지 지속된다. 또한 본 모델에서는 낮은 층에서 포장용수량을 초과되었을 경우 이루어지는 상향 운동에 대한 내용을 다루고 있다. 낮은 층에서 인접한 상위층으로의 이동은 다음의 식을 통해 두 층 사이의 수분 장력에 의해 조절된다. 추적 절차는 다음과 같다.

$$UF(1)=bu1*(0.8*T_2+0.2*T_1)^{bu2} \quad (90)$$

$$bu2=(WP2-FC2)/1.6576 \quad (90a)$$

$$bu1=10.^{(WP2-3.1761*bu2)} \quad (90b)$$

$$WP2=log(WP(1)) \quad (90c)$$

$$FC2=log(FC(1)) \quad (90d)$$

여기서 UF는 층 1에서 층 1-1까지의 상향 유동이고, 층 1의 수분 장력은 T_2 , 층 1-1는 T_1 이다. 여기서 유의할 점은 본 과정을 모의할 때 T_2 는 T_1 보다 훨씬 큰 가중치를 받는다는 것이다. 수분함량 정도에 관계없이 수분 장력은 다음의 식으로 산정된다.

$$T2=10.(3.1761-1.6576*(log(ST(1)-WP2)/(FC2-WP2))) \quad (91)$$

적절한 값을 가진 동일한 식이 T_1 을 산출하기 위해 사용된다.

다음 식을 사용하여 각 토양층에 대해 포화전도도가 입력되거나 산정된다.

$$SC(1)=12.7*X1*SS(1)/(X1+exp(11.45-0.097*X))+1.0 \quad (92)$$

$$X1=100.-CLA(1) \quad (92a)$$

여기서 CLA는 토양층 1에서의 점토 비율이고, SS는 토양 강도 계수이다. 이는 ‘성장 저해요인’ 부분에서 설명된다.

또한 침투과정은 동결온도에 의해 영향을 받는다. 물은 동결된 층으로 흐를 수 있지만 해당 층에서부터 삼투가 진행될 수는 없다.

2.2.4 증발산(Evapotranspiration)

본 모델은 잠재적인 증발을 예측하기 위한 5가지 방법을 제공하는데, 바로 Hargreaves와 Samani(1985), Penman(1948), Priestley-Taylor(1972), Penman-Monteith(Monteith, 1965), 그리고 Baier - Robertson(1965)법이다. Penman과 Penman-Monteith법은 입력값으로 태양 복사, 기온, 풍속 및 상대습도를 필요로 한다. 풍속, 상대습도 및 태양 복사 데이터를 이용할 수 없을 경우 Hargreaves와 Priestley-Taylor법이 보통 현실적인 결과물을 산출해 낸다. 캐나다에서 개발된 Baier-Robertson법은 추운 기후에서 좋은 결과물을 보인다.

본 모델은 Ritchie(1972)가 설명한대로 토양 및 식물에서 개별적으로 증발을 계산한다. 잠재적인 토양수 증발량은 잠재적인 증발 및 엽면적 지수(토양 표면 면적에 대한 작물 잎의 면적)의 함수로서 예측된다. 실제 토양수 증발은 토양깊이 및 수분 함량의 지수 함수를 통해 예측된다. 식물의 수분 증발은 잠재적인 증발과 엽면적 지수의 1차 방적식으로 모의된다.

잠재적인 증발(Potential Evaporation)

Penman법

잠재적인 증발을 예측하기 위한 Penman법(1948)은 다음의 식에 의한다.

$$EO=(RN*DLT/HV+GMA*FWV*VPD)/(DLT+GMA) \quad (93)$$

$$RN=RA*(1.0-AB)-RBO*(0.9*RA/RAMX+0.1) \quad (93a)$$

$$DLT=EA*(6790.5/TK-5.029)/TK \quad (93b)$$

$$HV=2.501-0.0022*TX \quad (93c)$$

$$GMA=6.595E-4*PB \quad (93d)$$

$$PB=101.3-ELEV*(.01152-5.44E-7*ELEV) \quad (93e)$$

$$FWV=2.7+1.63*U10 \quad (93f)$$

$$RBO=(0.34-0.14*\sqrt{ED})*4.9E-9*TK^4 \quad (93g)$$

$$VPD=EA-ED \quad (93h)$$

$$EA=.1*\exp(54.879-5.029*\ln(TK)-6790.5/TK) \quad (93i)$$

$$ED=EA*RH \quad (93j)$$

여기서 EO는 잠재적인 증발량(mm d⁻¹), DLT는 포화 증기압 곡선의 기울기(kPa °C⁻¹), GMA는 습도계 상수(kPa °C⁻¹), RN은 순수 복사량(MJ m⁻²d⁻¹), HV는 기화 잠열(MJ kg⁻¹), FWV는 풍속 함수(mm d⁻¹ kPa⁻¹), EA는 평균 기온에서의 포화 증기압(kPa), ED는 평균 기온에서의 증기압(kPa), TX 및 TK는 일 평균 기온(°C 및 °K), VPD는 증기압 차(kPa), U10는 10m 높이에서의 평균 풍속(m s⁻¹), RA는 태양 복사량(MJ m⁻² d⁻¹), RAMX는 지표면에서 맑은 날의 복사량(MJ m⁻² d⁻¹), RBO는 상향 장파 복사(MJ m⁻² d⁻¹), AB는 토양 반사율, RH는 상대 습도, PB는 대기압(kPa), ELEV는 해당 지역의 고도(m)이다.

Penman-Monteith법

Penman-Monteith법(Monteith, 1965)은 CO₂ 변화의 영향을 예측하는 수단으로 APEX 모델에 추가되었다(Stockle 등, 1992). Penman-Monteith의 식은 다음과 같다.

$$EO=(RN*DLT+86.66*AD*VPD*U10/350.)/(HV*(DLT+GMA)) \quad (94)$$

$$EP=(RN*DLT+86.66*AD*VPD/AR)/(HV*(DLT+GMA*(1.+CR/AR)) \quad (95)$$

$$AD=.01276*PB/(1.+0.00367*TX) \quad (95a)$$

$$AR=6.25*(\ln((ZZ-Z_D)/Z_0))^2/UZZ \quad (95b)$$

$$\begin{aligned} UZZ &= U10; \text{CPHT} < 8. & (95c) \\ ZZ &= 10. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} UZZ &= U10 * \text{LN}(ZZ / .0005) / 9.9035; \text{CPHT} > 8. & (95d) \\ ZZ &= \text{CHMX} + 2. \end{aligned}$$

$$Z_0 = 0.131 * \text{CPHT}^{0.997} \quad (95e)$$

$$Z_b = 0.702 * \text{CPHT}^{0.979} \quad (95f)$$

$$\text{CR} = p1 / (\text{SMLA} * G1 * \exp(.00155 * (330. - \text{CO}_2))) \quad (95g)$$

$$G1 = \text{GSI} * \text{FVPD} \quad (95h)$$

$$\text{FVPD} = 1.0 - b_x * (\text{VPD} - \text{VPTH}); 0.1 < \text{FVPD} < 1.0 \quad (95i)$$

여기서 AD는 공기밀도(kg m^{-3}), EP는 잠재적인 식물 증발량(mm d^{-1}), CR는 수증기 이동에 대한 캐노피 저항(s m^{-1}), AR는 열 및 수증기 이동에 대한 공기 역학적 저항(s m^{-1}), CPHT는 작물 높이(m), CHMX는 최대 가능 작물 높이(m), Z_b는 작물의 변위 높이(m), Z₀는 표면 조도 매개변수(m), UZZ는 작물 높이에 따라 조정된 일일 평균 풍속(m s^{-1}), SMLA는 특정 시기에 성장하는 모든 작물에 대한 엽면적 지수값의 합계이고, p1은 1.0~2.0사이의 매개변수, GSI는 작물의 잎 내성(s m^{-1}), VPTH는 해당 작물에 대한 임계 증기압, b_x는 작물 계수, CO₂는 대기 중의 이산화탄소 농도(g m^{-3})를 의미한다.

Priestley-Taylor법

Priestley-Taylor(1972)식은 바람 및 상대 습도를 입력하지 않고 잠재적인 증발량을 예측할 수 있는 방법을 제시한다. 다음과 같이 온도 및 복사량에만 근거한 간단식을 이용한다.

$$\text{EO} = 1.28 * (\text{RN} * (1.0 - \text{AB}) / \text{HV}) * \text{DLT} / (\text{DLT} + \text{GMA}) \quad (96)$$

Hargreaves법

Hargreaves(Hargreaves와 Samani, 1985)식은 외기 복사량과 기온의 함수를 통해 잠재 증발산을 예측하는 방법이다. Hargreaves식은 온도차 지수를 0.5~0.6으로 증가시켜 Penman-Monteith법의 연간 EO 추정치에 근접한 값을 갖기 위해 수정되었다. 또한 외기 복사는 RAMX로 대체되고 해당 계수는 적절한 변환을 위해 0.0023에서 0.0032로 조정되었다. 수정된 식은 다음과 같다.

$$\text{EO} = 0.0032 * (\text{RAMX} / \text{HV}) * (\text{TX} + 17.8) * (\text{TMX} - \text{TMN})^{0.6} \quad (97)$$

여기서 TMX와 TMN는 일일 최대 및 최소 기온(°C)이다.

Baier-Robertson법

Baier-Robertson(1965)식은 캐나다에서 널리 사용되고 주로 추운 기후에 사용된다. Hargreaves식처럼 Baier-Robertson식은 최소한의 데이터만을 요구하며 매우 적용성이 높다. 이 식은 다음과 같이 표현된다.

$$EO=0.288*TMX-0.144*TMN+0.139*RAMX-4.931 \quad (98)$$

수분 함유량이 5 mm 이상인 적설량의 경우 알베도 값은 0.6으로 설정된다. 적설량이 5 mm 이하이고 성장 중인 작물이 없는 경우 해당 토양의 알베도가 적절한 값이다. 작물이 성장 중일 경우 알베도는 다음의 식으로 산정된다.

$$AB=0.23*(1.-EAJ)+SALB*EAJ \quad (99)$$

여기서 0.23은 작물에 대한 알베도이고, SALB는 토양의 알베도, EAJ는 토양피복지수이다. 다음의 식에 따라 EAJ값의 범위는 0~1.0이다.

$$EAJ=\exp(-X1) \quad (100)$$

$$X1=\max(0.4*SMLA,0.1*(CV+.1)) \quad (100a)$$

여기서 CV는 모든 지상 작물의 무게이다.

토양 및 작물 증발(Soil and Plant Evaporation)

본 모델은 토양 및 작물의 증발을 Ritchie법(1972)과 유사한 방법으로 산출한다. Penman-Monteith 을 제외한 모든 방법이 다음의 식을 통해 잠재적인 작물 수분 증발량을 계산한다.

$$EP=LAI*EO/3.; \quad 0.0<LAI<3.0 \quad (101)$$

$$EP=EO; \quad LAI>3.0 \quad (101a)$$

여기서 EP는 잠재적인 작물의 수분 증발률(mm d⁻¹)이다. 토양수가 제한되어 있을 경우 작물의 수분 증발량은 본 장의 '작물 성장' 부분에서 논의한대로 감소할 것이다.

$$EO'=EO-RFI; \quad RFI<EO \quad (102)$$

$$EP'=\min(EO',EP) \quad (102a)$$

$$EO'=EO; \quad RFI>EO \quad (103)$$

$$SWLT=SWLT+RFI-EO \quad (103a)$$

$$EP'=0.0 \quad (103b)$$

$$ES=0.0 \quad (103c)$$

여기서 EO'는 잠재 증발량(mm d⁻¹)으로 강우 차단 정도에 따라 조정된다. ES는 잠재적인 토양 증발량, SWLT는 낙엽에 저장된 수분이다. 따라서 강우 차단량이

잠재적인 증발량보다 더 적을 경우(식 102) 여분의 EO는 작물 또는 토양 증발 작용에 사용될 수 있다. 반대의 경우(식 103) 여분의 차단량은 낙엽 수분 저장고로 이동되고 토양 및 작물 증발량은 0.0이 된다. EO를 이용 가능할 경우 잠재적인 토양 증발량은 다음의 식으로 예측할 수 있다.

$$ES=EO' *EAJ \quad (104)$$

$$ES'=\min(ES,ES*EO'/(ES+EP')) \quad (105)$$

여기서 ES는 잠재적인 토양수 증발률(mm d⁻¹)이다. 식 105는 작물이 물을 많이 사용하는 기간 동안 잠재적인 토양수 증발을 감소시킨다. 실제 토양수 증발량은 상부 0.2 m의 토양, 낙엽 저류량 및 적설량에 근거해 예측할 수 있다. 5 mm 이상의 눈(수분 함량)이 존재할 경우 EO를 예측하기 위해 알베도는 0.6으로 설정되고 EAJ는 0.5에 설정되며 눈은 이 속도로 증발한다. 모든 눈이 증발했을 경우 낙엽에 포함된 수분은 증발되고, 마침내 토양수의 증발이 시작된다. 다음의 식에 따라 이러한 증발과정은 토양의 깊이 및 수분 함량에 따라 달라진다.

$$EVZ=ESR*Z/(Z+\exp(2.374-0.00713*Z)) \quad (106)$$

EVZ는 토양 깊이 Z로부터의 총 잠재 토양수 증발량(mm d⁻¹)이고, ESR은 눈과 낙엽의 증발 이후 남아있는 잠재적인 토양 증발량이다. 식 106의 계수는 Z=10 mm일 때 EVZ=0.5*ESR이고, Z=100 mm일 때 EVZ=0.95*ESR가 되도록 설정된다. 토양층에 대한 잠재적인 토양수 증발은 층 경계의 EVZ값 차이를 이용하여 예측할 수 있다.

$$SEV(1)=EVZ(1)-EVZ(1-1) \quad (107)$$

여기서 SEV는 층 1에 대한 잠재적인 토양 증발량(mm d⁻¹)이다. 토양수 증발에 대한 깊이 분산 예측치는 토양층 내 토양수의 양이 한정되어 있을 경우 감소할 수 있다.

$$SEV'(1)=SEV(1)*\exp(2.5*(ST(1)-FC(1))/(FC(1)-WP(1))); \quad (108)$$

$$WP<ST<FC$$

$$SEV'(1)=SEV(1); FC<ST \quad (108a)$$

$$SEV'(1)=ST(1)-p5*WP(1); (ST(1)-p5*WP(1))<SEV(1) \quad (108b)$$

여기서 SEV'는 조정된 토양수의 증발 예상치(mm)이고 p5의 범위의 경우 토양 상위 0.5 m 지점에서는 0.0~1.0이며, 0.5 m 미만에서는 1.0으로 설정된다. 따라서 APEX 모델은 상위 0.5 m 지점이 위조점의 특정 분획까지 건조하도록 조정될 수 있다.

2.2.5 용설량(Snowmelt)

눈이 있을 경우 두번째 토양층의 온도가 0°C를 초과할 때 해빙될 수 있다. 눈은 눈덩이로 뒤덮인 토양온도의 함수로서 다음의 식을 사용하여 해빙된다.

$$SML=AMAX1(0.,X1*(1.52+.54*F*SNPKT)); 0.0<SML<SNO \quad (109)$$

$$SNPKT=.3333*(2.*X2+TX) \quad (109a)$$

$$X1=sqrt(TMX*RA) \quad (109b)$$

$$X2=min(DSTO,STMP(2)) \quad (109c)$$

$$F=TSNO/(TSNO+exp(5.34-2.395 *TSNO)) \quad (109d)$$

여기서 SML은 용설률(mm d⁻¹), SNO는 물에 존재하는 눈(mm), STMP는 토양층 2의 온도(°C), SNPKT는 눈덩이로 뒤덮인 토양온도의 온도(°C), DSTO는 토양 표면 온도(°C), TSNO의 눈덩이로 뒤덮인 토양의 일수(d)이다. STMP와 DSTO를 예측하기 위한 식은 ‘토양 온도(soil temperature)’ 부분에서 논의된다. 유출량과 침투량을 예측하기 위해 해빙된 눈은 강우와 동일한 방식으로 취급되지만 강우 에너지는 0.0으로 설정되고 침투 강우율의 예측은 강우량이 24시간 동안 일정하게 분포되었다는 가정에 근거하여 이루어진다.

2.2.6 지하수면역학(Water Table Dynamics)

지하 수면 높이는 외부 수분 효과를 감안하기 위해 근권에서 진행되는데 기타 다른 토양수와는 직접적인 연결 없이 모의된다. 본 모델은 지표면에서부터 최대 및 최소 깊이의 입력 값 사이에서 지하 수면을 증가시키거나 감소시킨다.

$$WTBL = WTBL0 - X2*(WTBL0 - XX) \quad (110)$$

$$X2 = \text{MINIMUM} (\text{PARM } 88) \text{ or } \text{ABS}(\text{RTO}) * X1 \quad X2 < 1.0 \quad (110a)$$

$$\text{RTO} = (\text{SMRF} - \text{SMEO}) / \text{SMEO} \quad (110b)$$

$$\text{RTO} > 0.0$$

$$X1 = 1.0$$

$$XX = \text{WTMN}$$

$$\text{RTO} < 0.0$$

$$X1 = \text{PARM}(87) * (\text{JULIAN DAY} / \text{TOTAL NUMBER OF DAYS IN YEAR})^{\text{PARM}89}$$

$$XX = \text{WTMX}$$

여기서 WTBL은 오늘의 지하수면 깊이(m), WTBL0는 어제의 지하수면 깊이(m), SMRF는 선행 기간 동안의 일일 강수량의 합(mm), SMEO는 선행기간 동안 토양층 2에서 토양온도의 합(mm), WTMN는 지표면에서 지하수면까지의 최소 가능 거리(m), WTMX는 토양표면에서 지하수면까지의 최대 가능 거리(m), PARM(87)는 지하수면의 후퇴 속도를 늦추기 위해 사용되며, PARM(88)는 일일 지하수면 운동을 제한한다. 이는 WTBL 및 WTMX간에 발생하는 차이에 대한 분획이고 PARM(89)는 시간비의 지수이다. 선행

기간(IWTB)은 5~30일 범위 내에서 사용자가 지정 가능하다.

2.3 토양유실(Soil Erosion)

2.3.1 물(Water)

강우/유출수(Rainfall/Runoff)

물 침식 관련 APEX 모델의 구성 요소는 강우/유출수 및 관개(스프링쿨러와 고랑)에 의해 발생하는 침식을 모의한다. 강우/유출수에 의한 침식을 모의하기 위해 APEX 모델은 7개의 공식을 포함하는데, 이는 USLE(Wischmeier와 Smith, 1978), USLE의 Onstad-Foster 수정 버전(Onstad와 Foster, 1975), RUSLE(Renard 등, 1997), MUSLE(Williams, 1975b) 및 최근 개발된 2개의 MUSLE 변형식, 입력 계수를 수용하는 MUSLE 구조가 그것이다. 이 중에서 사용자가 지정한 오직 하나의 공식만이 기타 다른 APEX 모델의 구성 요소와 상호 작용하게 된다. 에너지 구성 요소를 제외하고 이 6개의 공식은 동일하다. USLE 공식은 침식 에너지의 지표로서 강우량에 높은 의존성을 보인다. MUSLE와 그 변형식은 침식 및 퇴적량에 대한 모의를 하기 때문에 유출 변수만을 사용한다. 유출 변수는 예측 정확도를 증가시키고, USLE에서 퇴적량을 예측하기 위해 사용되는 전달률을 사용할 필요가 없으며 퇴적량 대한 단일 강우 발생에 대한 유사량 예측치를 제공할 수 있는 공식을 가능하게 한다. USLE는 오직 연간 예측치만을 제공한다. Onstad-Foster 공식은 USLE와 MUSLE 에너지 인자를 절충한 것이다.

따라서, 수분 침식 모델은 다음의 공식을 사용한다.

$$Y=X*EK*CVF*PE*SL*ROKF \quad (111)$$

$$X=EI \quad \text{USLE, RUSLE} \quad (111a)$$

$$X=0.646*EI+0.45*(Q*q_p)^{0.33} \quad \text{Onstad-Foster} \quad (111b)$$

$$X=1.586*(Q*q_p)^{0.56}*WSA^{0.12} \quad \text{MUSLE} \quad (111c)$$

$$X=2.5*(Q*q_p)^{0.5} \quad \text{MUST} \quad (111d)$$

$$X=0.79*(Q*q_p)^{0.65}*WSA^{0.009} \quad \text{MUSS} \quad (111e)$$

$$X=by1*Q^{by2}*q_p^{by3}*WSA^{by4} \quad \text{MUSI} \quad (111f)$$

여기서 Y는 퇴적량(t ha⁻¹), EK는 토양 침식성 인자, CVF는 작물 관리 인자, PE는 침식 제어 인자, SL은 경사장 및 경사도 인자, ROKF는 조립 암석 조각 인자, Q는 유출량(mm), q_p는 침투 유출률(mm h⁻¹), WSA는 유역 면적 (ha)이다. MUST는 퇴적물 농도의 기저값에서 이론적으로 발전된 새로운 공식이고, MUSS는 소규모 유역

데이터(수로 침식 없음)에 맞게 개발된 새로운 공식이고, MUSI는 4가지 계수를 사용자 입력값으로 허용한다(by1...by4). PE값은 토양 보전 수단을 적용할 것을 감안하여 초기에 결정된다. USLE에서 SL값은 다음의 식과 함께 산출된다(Wischmeier와 Smith, 1978).

$$SL=(SPLG/22.127)^{XM}*(STP*(65.41*STP+4.56)+.065) \quad (112)$$

$$XM=0.3*STP/(STP+\exp(-1.47-61.09*STP))+0.2 \quad (112a)$$

여기서 STP는 지표면의 경사($m\ m^{-1}$)이고 SPLG는 경사장(m)이다. RUSLE의 경우 SL 값은 다음의 식에 의해 산출된다(Renard 등, 1997).

$$SL=RSF*RLF \quad (113)$$

$$RSF=10.8*STP+0.03; \quad SPLG>4.57; \quad STP<0.09 \quad (113a)$$

$$RSF=16.8*STP-0.5; \quad SPLG>4.57; \quad STP>0.09 \quad (113b)$$

$$RSF=X1; \quad SPLG<4.57 \quad (113c)$$

$$X1=3.*STP^{0.8}+.56 \quad (113d)$$

$$RLF=(SPLG/22.127)^{RXM} \quad (113e)$$

$$RXM=B/(1.+B) \quad (113f)$$

$$B=STP/ (.0896*X1) \quad (113g)$$

APEX 모델 사용자는 SL을 침식 공식에 적용하기 위해 식 112 또는 113을 선택할 수 있다.

다음의 수정된 RUSLE 공식을 사용하여 유거수가 발생하는 모든 날에 대한 작물 관리 인자를 평가할 수 있다.

$$CVF=FRSD*FBIO*FRUF \quad (114)$$

$$FRSD=\exp(-0.75*CVRS) \quad (114a)$$

$$FBIO=1.-FGC*\exp(-0.1*CPHT) \quad (114b)$$

$$FRUF=\exp(-.026*(RRUF-6.1)) \quad (114c)$$

$$FGC=STL/(STL+\exp(1.175-1.748*STL)) \quad (114d)$$

여기서 FRSD는 작물 잔사 인자, FBIO는 성장하는 바이오매스 인자, FRUF는 토양의 무작위 조도 인자, CVRS는 지상 작물 잔사($t\ ha^{-1}$), CPHT는 작물 높이(m), RRUF는 토양 표면의 무작위 조도(mm), STL은 작물의 살아있는 바이오매스량($t\ ha^{-1}$), FGC는

생장하는 작물의 부분 지표 피복이다.

표토층의 토양 침식성 인자인 EK는 다음의 식에 의해 모의되는데 매년 초에 평가된다.

$$EK=X1*X2*X3*X5 \quad (115)$$

$$X1=0.2+0.3*\exp(-0.0256*SAN*(1-.01*SIL)) \quad (115a)$$

$$X2=(SIL/(CLA+SIL))^{0.3} \quad (115b)$$

$$X3=1.0-0.25 *WOC/(WOC+\exp(3.718-2.947*WOC)) \quad (115c)$$

$$X5=1.0-0.7*SN1/(XX+\exp(-5.509+22.899*SN1)) \quad (115d)$$

$$SN1=1.0-0.01*SAN \quad (115e)$$

여기서 SAN, SIL, CLA, WOC는 해당 토양의 모래, 퇴적물, 점토 및 유기 탄소 함유량(%)이다. 식 115에 의해 EK는 0.1에서 0.5까지 변화할 수 있다. 첫번째 기간에는 조립사 함유량이 높은 토양에 대해 낮은 EK값을 보이며 모래가 거의 없는 토양의 경우에는 높은 값을 보인다. 세사 함유량은 모래와 유사의 곱을 100으로 나눈 값으로 예측할 수 있다. 첫번째 기간 중 조립사에 대한 식은 모래와 예측된 세사량 간의 차이일 뿐이다. 두번째 기간에는 높은 점토-세사 비율을 가진 토양에 대한 EK값을 감소시킨다. 세번째 기간에는 높은 유기탄소 함유량을 지닌 토양의 EK값을 감소시킨다. 네번째 기간에는 극도로 높은 모래 함유량을 지닌 토양의 EK값을 감소시킨다(SAN>70%).

유출 모델은 Q 및 q_p 에 대한 예측치를 제공한다. 시간 분산된 강우가 부재한 상황에서 일일 강우 에너지를 예측하기 위해서 강우량은 지수적으로 분포된다는 가정에 따른다.

$$r_t=r_p*\exp(-t/k) \quad (116)$$

여기서 r_t 는 t시기의 강우율(mm h^{-1}), r_p 는 첨두 강우율(mm h^{-1}), k는 붕괴 상수(h)이다. 식 116은 강우량의 순서에 대한 어떠한 가정도 포함하고 있지 않다. USLE 에너지 공식은 미터법 단위에 따르며 다음과 같다.

$$RE=dRFV*(12.1+8.9*\log(dRFV/dt)) \quad (117)$$

RE는 물에 의한 침식 방정식에 대한 강우 에너지이며, dRFV는 시간 간격 dt(h) 동안의 강우량(mm)이다. 이 에너지 공식은 강우율을 구하기 위한 식 116을 활용하여 분석적으로 표현되고 통합되어 다음의 식을 유도한다.

$$RE=RFV*(12.1+8.9*(\log(r_p)-0.434)) \quad (118)$$

강우 에너지 인자 EI은 식 118을 최대 0.5-h 강우강도($r_{.5}$)로 곱하고 적절한 단위로 변환하여 얻을 수 있다.

$$EI=RFV*(12.1+8.9*(\log(r_p)-0.434))*r_{.5}/1\ 000. \quad (119)$$

r_p 값을 산출하기 위해 식 116은 통합되어 다음과 같은 결과를 갖게 된다.

$$RFV=r_p*k \quad (120)$$

$$RFVt=RFV*(1.0-\exp(-t/k)) \quad (121)$$

RFV_{.5}값은 본 장의 ‘수문학(Hydrology)’ 부분에서 기술한 것처럼 $alp_{.5}$ 를 사용하여 예측할 수 있다.

$$RFV_{.5}=RFV*alp_{.5} \quad (122)$$

r_p 값을 결정하기 위해서 식 122와 120은 식 121로 대체되어 다음과 같은 결과를 갖게 된다.

$$r_p=-2.0*RFV*\ln(1.0-arp_{.5}) \quad (123)$$

강우율은 계절에 따라 변화하기 때문에 $alp_{.5}$ 는 Weather Service의 정보를 활용하여 매달 평가된다(U.S. Department of Commerce, 1979). 최대 0.5-h 강우량이 발생하는 주기는 Hazen의 도시 위치 공식을 활용하여 예측할 수 있다(Hazen, 1930).

$$F=1.0/(2.0*NWD*NY) \quad (124)$$

여기서 F는 강우 발생 주기이다. 각 달에 발생하는 강우사상의 수는 기록 년의 수(NY)와 해당 월의 평균 강우사상 발생 건수를 곱한 값(NWD)이다. 평균 $alp_{.5}$ 값을 예측하기 위해서는 평균 RFV_{.5} 예측치를 구해야 한다. RFV_{.5}값은 최대 0.5-h 강우량이 지수적으로 분포되었다는 가정 하에 쉽게 산출할 수 있다. 지수 분포로부터 평균 0.5-h 강우량은 다음과 같다.

$$RFV_{.5a}=-RFV_{.5u}/\ln(F) \quad (125)$$

여기서 RFV_{.5a}는 해당 월의 평균 최대 30분 강우량(0.5-h 강우)이고, RFV_{.5u}는 주기 F에 대한 최대 30분 강우량이다. 평균 $alp_{.5}$ 는 다음의 식에 의해 산출된다.

$$arp_{.5}=-RFV_{.5a}/RFV \quad (126)$$

여기서 RFV는 각 사상에 대한 평균 강우량(평균 월별 강우/비가 온 평균 일수)이다. 일일 $arp_{.5}$ 값은 삼각 분포에서 발생되는데 균일한 강우율을 통해 결정되는 하한치는 0.5/24 또는 0.0208에 비슷한 $arp_{.5}$ 값을 가진다. 큰 규모의 사상에서 모든 강우가 30분 동안($arp=1$) 발생할 가능성은 매우 희박하다. $arp_{.5}$ 의 상한치는 높은 r_p 값(250 mm h⁻¹는 일반적으로 강우강도 상한치에 근접하다)을 식 121로 대체하여 예측할 수 있다.

$$alp_{.5u}=1.0-\exp(125.0/RFV) \quad (127)$$

여기서 $alp_{.5u}$ 는 $alp_{.5}$ 의 상한치이다. 식 126의 $alp_{.5}$ 는 .5 삼각분포의 첨두값이다.

$$ROKF=\exp(-0.03*ROK) \quad (128)$$

여기서 ROK는 토양 표면층의 조립 암편의 비율이다.

관개(Irrigation)

고랑이 있거나 평편한 지표면에 관개용수로 인해 발생하는 침식을 예측할 수 있다. 두 경우 모두 유동은 일정하게 일어나며 다음과 같은 공식을 통해 산출할 수 있다.

$$QPX=QXM/24. \quad (129)$$

여기서 QPX는 유동률($m\ h^{-1}$), QXM은 사용비율($mm\ d^{-1}$)이다. 고랑 관개의 경우 유속을 결정하기 위해 유동률은 $m^3\ s^{-1}$ 로 변환된다.

$$QPX'=2.778E-6*QPX*RINT*WSA/FW \quad (130)$$

여기서 QPX'는 유동률($m^3\ s^{-1}$), RINT는 둑 간격(m), WSA는 유역 면적(ha), FW는 경지 폭(km)이다. 유속은 고랑이 삼각형의 수로라는 가정 하에 Manning 을 통해 예측할 수 있다.

$$VX=R^{0.667}*WSX \quad (131)$$

$$WSX=\sqrt[n]{STP}/n \quad (131a)$$

$$R=AX/PX \quad (131b)$$

$$AX=0.5*DX*X2 \quad (131c)$$

$$X2=DX*X1 \quad (131d)$$

$$X1=1000.*RINT/RHTT \quad (131e)$$

$$PX=2.0*\sqrt{DX*DX+0.25*X2*X2} \quad (131f)$$

$$DX=(2.0*QPX'/(WSX*X1*(1.0/(4.0+16.0/(X1*X1)))^{0.333}))^{0.375} \quad (131g)$$

여기서 VX는 유속($m\ s^{-1}$), STP는 경지 경사($m\ m^{-1}$), n은 Manning의 조도 계수, AX는 단면적(m^2), PX는 적은 주변(m), DX는 유동 깊이(m)이다. 고랑 침식은 다음의 식을 통해 예측할 수 있다.

$$Y=10.*QXM*CY*EK \quad (132)$$

여기서 Y는 해당 경지에 대한 퇴적량($t\ ha^{-1}$), CY는 퇴적물 농도($t\ m^{-3}$)이다. 퇴적물 농도는 수정된 Bagnold의 퇴적물 이동 공식(Bagnold, 1977)을 이용하여 산출 가능하다.

$$CY=CY_1*VX^{p31} \quad (133)$$

여기서 CY_1 은 1.0 m s^{-1} 의 속도에서 퇴적물 농도를 의미하며 $p31$ 는 1.0에서 1.5의 범위에 있는 퇴적물 추적 지수(Bagnold의 초기 방정식에서 1.5)이다. 평평한 땅에서의 침식은 다음과 같이 MUST식을 통해 예측 가능하다.

$$Y=2.5*(QXM*QPX)^{0.5}*EK*CVF*PE*SL \quad (134)$$

2.3.2 바람(Wind)

초기의 APEX 풍속 모델(WEQ)은 구동 변수로서 일일 평균 풍속을 필요로 한다. 신규 APEX 풍속 모델인 WECS(Wind Erosion Continuous Simulation)는 좀 더 기계론적인 침식 공식을 이용하기 위해 풍속의 일일 분포량을 필요로 한다. 새로운 접근 방법은 풍속 분포도를 이용하여 침식 공식을 통합해 나지에서 하루 동안의 진행되는 잠재적인 풍속량을 예측한다. 잠재적인 침식은 토양특성, 표면조도, 피복, 바람의 방향에서 경지로 가로지르는 거리에 기초한 4가지 요인을 이용하여 조정된다.

기본 공식

기본 WECS 풍식 공식은 다음과 같다.

$$YW=FI1*FRF*FV*FD*YWR \quad (135)$$

여기서 YW 는 풍식(kg m^{-1}), $FI1$ 는 토양 침식성 인자, FRF 는 표면 조도 인자, FV 는 작물 피복 인자, FD 는 대상 지역을 가로지르는 바람의 비보호 이동 거리 인자, YWR 은 한계 속도보다 더 큰 바람이 지속되는 동안의 풍식률 누적값을 의미한다. 풍식률은 다음의 Skidmore(1986) 공식을 통해 산출된다.

$$YWR'=wn4*(AD/AG)*(USTR^2-USTRT^2-0.5*(ST/WP)^2)^{1.5} \quad (136)$$

$$USTR=0.0408*DU10 \quad (136a)$$

$$USTRT=0.0161*\text{sqrt}(DIAM) \quad (136b)$$

여기서 YWR' 은 풍식률($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$), $wn4$ 은 매개변수(정상값=2.5), AD 는 공기 밀도(kg m^{-3}), AG 는 중력 가속도(m s^{-2}), $USTR$ 는 마찰 속도(m s^{-1}), $USTRT$ 는 임계 마찰 속도(m s^{-1}), ST 와 WP 는 표토층의 1500 kPa 실제 수분 함량, $DU10$ 은 t시의 풍속(m s^{-1}), $DIAM$ 는 토양 입경(m)을 의미한다. 식 136의 토양수 관련 항은 Chepil(1956)과 Skidmore(1986)에 의해 개발되었다. 중력 가속도가 9.8 m s^{-2} 이고 공기 밀도가 1 kg m^{-3} 이라고 가정하면 다음과 같은 최종 침식률 공식을 얻게 된다.

$$YWR'=0.255*(USTR^2-USTRT^2-0.5*(ST/WP)^2)^{1.5} \quad (137)$$

토양 침식성 인자(Soil Erodibility Factor)

WECS는 다음의 식을 통해 무차원 식으로 표현된 WEQ의 토양 침식 개념을 이용한다.

$$FI1=FI/695. \quad (138)$$

여기서 FI는 Woodruff와 Siddoway(1965) 모델의 토양 침식 인자($t \text{ ha}^{-1}$), FI1은 새로운 모델의 무차원 토양 침식 인자를 의미한다.

조도계수(Roughness Factor)

조도계수(FR)는 Potter 등(1990)이 개발한 대피각 개념에 근거한다. 이 조도지수는 약동하는 입자에 의해 발생하는 마모에 취약한 부분을 예측함으로써 토양 표면의 침식 가능 영역을 산출한다. 대피각 지수는 임의의 흩덩이 수준의 조도와 경운 작업으로 인한 조도를 모두 포함한다. 방향성을 가진 조도의 영향력은 풍향에 따라 변화하는데 이는 모의 장소와 근접한 풍향의 통계적 분포를 얻기 위해 매일 선택된다. FR은 다음의 식을 통해 예측할 수 있다(Potter와 Zobeck, 1990).

$$FR=1.0-\exp(-(\text{wn}1/\text{RFB})^{\text{RFC}}) \quad (139)$$

여기서 wn1는 약동하는 모래 입자의 하강 각도(약 수평으로 10°)이다. 15° 충돌각이 최대 골재 마모를 초래한다고 알려져 있다(Hagen 등, 1988).

RFB 계수는 다음의 식에 의해 산출된다.

$$\text{RFC}=0.77*1.002^{\text{RHTT}} \quad (140)$$

여기서 RHTT는 능선 높이(mm)이고 RFB 계수는 다음의 식에 의해 예측된다.

$$\text{RFB}=\text{RRF}+\text{RIF} \quad (141)$$

$$\text{RRF}=11.9*(1.-\exp(-\text{RRUF}/9.8)^{1.3}) \quad (141a)$$

$$\text{RIF}=\text{abs}(\sin(\text{wn}2))*1.27*\text{RHTT}^{0.52} \quad (141b)$$

여기서 RRF는 흩덩어리 조도 인자를 의미하며, RRUF는 임의의 조도(mm), RIF는 능선 조도 인자, wn2는 능선에 대한 바람의 각도를 의미한다. RRUF와 RHTT는 바람과 물에 의한 침식 및 경작에 의한 변형을 겪는다.

작물 피복 인자(Vegetative Cover Factor)

작물 피복 인자는 초창기 EPIC 모델에서 사용된 접근법에 기반한다. 작물 피복 등가계수는 살아있는 수직형 바이오매스, 죽은 수직형 잔사물 또는 수평형 작물 잔사물에 따라 매일 모의된다.

$$\text{VGF}=1.-\text{X}1/(\text{X}1+\exp(-0.331-1.055*\text{X}1)) \quad (142)$$

$$\text{X}1=\text{bwn}(1)*\text{STL}+\text{bwn}(2)*\text{STD}+\text{bwn}(3)*\text{RSD} \quad (142a)$$

여기서 VGF는 작물피복 등가계수, STL은 수직형 바이오매스($t \text{ ha}^{-1}$), STD는 수직형

작물 잔사량($t\ ha^{-1}$), RSD는 평행형 잔사량($t\ ha^{-1}$), bwn 1, 2, 3은 특정 작물에 대한 계수이다.

비보호 거리 인자(Unsheltered Distance Factor)

우세한 풍향에 따른 경지 길이는 초기 모델(Cole 외, 1982)에서와 마찬가지로 경지 치수 및 지향성과 풍향을 고려하여 산출된다. 새로운 모델의 거리 인자(FD)는 Stout(1990)가 서술한대로 다음의 식을 활용하여 구할 수 있다.

$$FD=1.-exp(-WL/wn3) \quad (143)$$

$$WL=FL*FW/(FL*abs(cos(BT))+FW*abs(sin(BT))) \quad (143a)$$

$$BT=1.571+THW-ANG \quad (143b)$$

여기서 WL은 우세한 풍향에 따른 비보호 경지 거리(km), FL은 경지 길이(km), FW는 경지 폭(km), THW는 북쪽에서부터 시계 방향으로의 풍향(radians), ANG는 필드 길이 및 북쪽 사이의 시계 방향 각도이며 wn3은 실험을 통해 $0.05 < wn3 < 0.09$ 범위에 있는 것으로 결정된 매개변수이다. APEX 모델에서는 0.07의 값이 사용된다. 스텝 변수 f를 사용하여 식 137과 17을 계수적으로 통합할 수 있다. 낮은 풍속을 모의하기 위하여 초기에는 큰 스텝값 $f=0.$ 이 사용된다. 높은 속도에서는 풍속 분포에 대한 더 높은 수준의 선명도를 얻기 위해 f값을 줄임으로써 스텝의 크기를 줄인다.

2.4 가축분뇨 침식(Manure Erosion)

가축분뇨는 방목장과 가축분뇨가 시용된 농경지로부터 침식 과정을 겪게 된다. 토양을 피복하는 가축분뇨의 양에 따라 모두 가축분뇨인 상태에서 가축분뇨와 토양이 혼합된 상태까지 다양하다. 가축분뇨는 잔류물로 간주되기 때문에 가축 사육장에서의 심한 피복 상태는 토양 침식 가능성을 완전히 차단하지만 심각한 가축분뇨 침식 가능성이 있다. 잔디로 잘 덮인 농경지에 가축분뇨가 시용된 경우 토양 침식의 가능성은 매우 낮지만, 가축분뇨의 침식 가능성은 매우 높다. 유기 영양분 및 탄소의 손실은 다음의 식 155에서 설명한대로 농축비율, 토양내 양분함량, 토양 침식률 등을 활용해 예측가능하다. 그러나 이러한 접근법에서는 토양 침식률이 거의 0에 가깝기 때문에 유기 양분 및 탄소 손실이 실제보다 적게 예측되게 된다. 이러한 단점 때문에 유기 양분 및 탄소 손실에 대한 직접적인 예측치를 제공하는 가축분뇨 침식 공식이 필요하게 되었다. 이는 토양 침식 공식 MUST에 기반을 두고 있다.

$$YMNU=0.25*(Q*q_p)^{0.5}*PE*SL*RSDM^{0.5}*exp(-.15*AGPM) \quad (144)$$

여기서 YMNU는 가축분뇨 침식($t\ ha^{-1}$), Q는 유출량(mm), q_p 는 첨두 유출률($mm\ h^{-1}$), PE는 토양 침식 제어 인자, SL은 경사 및 경사장 인자, RSDM은 토양 표면의 가축분뇨량($t\ ha^{-1}$), AGPM은 살아있거나 죽은 수직형 작물 물질을 의미한다. 유기 양분

및 탄소 손실은 YMNU 및 해당 가축분뇨에서 유기질소, 인 및 탄소의 분획을 곱한 값으로 산출된다.

2.5 양분(Nutrients)

2.5.1 질소(nitrogen)

질산염 유실-침출(Nitrate losses-leaching), 지표 유거수(Surface runoff), 측면 지표아래 유동(Lateral subsurface flow)

물이 토양층으로 흘러들어갈 때 유실되는 NO₃-N의 양은 다음과 같이 농도 변화를 고려하여 예측할 수 있다. 따라서 다음의 식으로 산출한다.

$$QNO_3 = QT * CNO_3 \quad (145)$$

여기서 QNO₃는 토양층에서 유실되는 NO₃-N의 양이고, CNO₃는 해당 층에 이루어지는 QT양 만큼의 침투가 이루어지는 동안 해당 층에 존재하는 NO₃-N의 평균 농도를 의미한다. 해당 일의 마지막에 토양층에 남아있는 NO₃-N의 양은 다음과 같다.

$$WNO_3' = WNO_3 - QT * CNO_3 \quad (146)$$

여기서 WNO₃와 WNO₃'는 해당 일의 시작과 마지막 시점에 토양층에 포함된 NO₃-N의 중량이다. NO₃-N 농도는 NO₃-N의 중량을 수분 저장량으로 나누어 산출된다.

$$CNO_3' = CNO_3 - CNO_3 * QT / (bs1 * PO * (1 - 0.01 * ROK) \cdot 2) \quad (147)$$

여기서 CNO₃'는 해당 일 마지막 순간의 NO₃-N 농도이고, PO는 토양의 공극, bs1는 침투수가 점유한 저수지 PO의 분획이다. 식 147은 지수 방정식에 대한 유한 차분 근사치이다.

$$CNO_3' = CNO_3 * \exp(-QT / (bs1 * PO)) \quad (148)$$

따라서 QNO₃는 QT 수준에 상관없이 식 148을 통합하여 구할 수 있다.

$$QNO_3 = WNO_3 * (1.0 - \exp(-QT / (bs1 * PO))) \quad (149)$$

QT의 침투기간 동안(APEX 모델은 일단위 모델이므로 여기서는 하루를 말한다), 평균 농도는 다음과 같다.

$$CNO_3 = QNO_3 / QT \quad (150)$$

침투는 보통 유출이 시작되기 전에 시작되기 때문에 수직 유동 농도는 보통 수평 유동보다 더 높은 편이다. 상대적인 농도는 사용자가 매개변수 p14를 구체적으로 정할 수 있다.

$$p14=CS/CO \quad (151)$$

여기서 p14는 거의 0.0~1.0(보통 0.5)에 이르는 매개변수이며, CS는 수평 농도, CO는 수직 농도를 의미한다. 다음의 식을 통해 QNO₃는 수직 및 수평적 구성요소로 나누어진다.

$$QNO_3=CO*QV+CS*QH \quad (152)$$

식 151을 식 152로 대체하여 CO를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$CO=QNO_3/(QV+p14*QH) \quad (153)$$

$$CS=p14*CO \quad (153a)$$

유출수, 측면 유동, 빠른 복귀류 및 수평 관내 유동 내에 포함된 NO₃-N의 양은 유동 구성요소와 CS를 곱한 값으로 산정할 수 있다. 침투 및 수평 관내 유동 부하는 마찬가지로 CO를 사용하여 예측할 수 있다.

토양수 증발을 통한 NO₃-N 이동(NO₃-N transport by soil water evaporation)

토양에서 수분이 증발될 때 NO₃-N는 질량 흐름을 통해 표토층으로 이동한다. 이러한 NO₃-N 이동을 예측하는 식은 다음과 같다.

$$ENO_3=SEV(1)*CNO_3(1) \quad (154)$$

여기서 ENO₃는 mm단위로 표시되는 토양수 증발(SEV)로 인해 토양층 1에서 토양층 1-1로 이동한 NO₃-N의 양(kg ha⁻¹)을 의미한다.

유사에 의한 유기 N 이동(Organic N transport by sediment)

개별 유거수 사상에 적용을 위해 McElroy 등(1976)이 개발하고 Williams와 Hann(1978)이 수정한 부하 함수가 유기질소 손실을 예측하기 위해 사용된다.

$$YON=0.001*Y*CON*ER \quad (155)$$

여기서 YON은 유기질소 유출 손실량(kg ha⁻¹), Y는 퇴적량 (t ha⁻¹), CON은 표토층 내의 유기질소 농도(g t⁻¹), ER은 농축비율을 의미한다. 농축비율은 유사내 유기질소의 농도를 토양의 유기질소 농도로 나눈 값이다. 농축비율은 Menzel(1980)이 설명한대로 퇴적물 농도와 대수적으로 관련이 있다. APEX 모델에서는 위와 아래 경계를 감안한 각 사상에 대한 농축-퇴적물 농도 관계식을 개발하였다. 농축비율의 위 경계는 퇴적물 전달률의 정반대이고, 이를 초과하는 것은 토양에서 제거된 것보다 더 많은 유기질소가 유역을 떠난다는 것을 의미한다. 각 유거수 사상에 대한 전달률은 다음의 식으로 산정할 수 있다.

$$DR=(q_p/rep)^{0.56} \quad (156)$$

여기서 DR은 퇴적물 전달률(총 표층 침식으로 나눈 퇴적물 유출량), q_p 는 침투 유출률(mm h^{-1}), rep 는 침투 초과 강우율(mm h^{-1})이다. 식 156은 MUSLE를 사용하여 예측된 퇴적물 유출량에 기반한다. Green-Ampt 침투식은 각 강우 사상 전체의 초과 강우량 증가분을 계산하여 rep 를 쉽게 추출 가능하도록 한다. 또한, 이후 제안된 홍수 추적 방법의 일부로서 수문곡선 산출시에는 초과 강우량이 계산된다. 그러나 유출 곡선 지수가 사용되고 일일 유출량만이 산출될 때, 초과 강우량은 직접 평가되지 않는다. 그러나 해당 비율에 대한 예상치는 다음의 식을 사용해서 구할 수 있다.

$$rep=r_p*(Q/RFV)^{0.1} \quad (157)$$

여기서 r_p 는 침투 강우율(mm h^{-1}), 유출수-강우 비율 Q/RFV 는 침투 과정을 설명하기 위해 사용된다. Q/RFV 는 침투에 대한 강도의 영향력을 설명하기 위해 0.1 제곱으로 증가된다.

농축비율의 하한치는 1.0으로 퇴적물 입자크기 분포는 토양의 경우와 동일하다. 따라서 $1 < ER < 1/DR$ 이다. 농축비율 예측하는 대수 방정식은 다음과 같다.

$$ER=be1*CY^{be2} \quad (158)$$

여기서 CY 는 퇴적물 농도(t m^{-3}), $be1$ 와 $be2$ 는 상/하한치에 의해 설정된 매개변수이다. 농축률이 1.0에 근접하기 위해서 퇴적물 농도는 극도로 높아야 한다. 반대로 농축률이 $1/DR$ 에 근접하기 위해서는 퇴적물 농도는 낮아야 한다. 퇴적물 농도의 범위가 0.000200에서 0.1 t m^{-3} 라는 가정 하에 경계부분에서 식 154으로 모의할 수 있다.

$$be2=\log(DR)/2.699 \quad (159)$$

$$be1=1.0/0.1^{be2} \quad (160)$$

탈질(Denitrification)

미생물 공정의 하나로 탈질은 온도와 수분함량의 함수이다. 탈질률을 예측하기 위해 다음의 식이 사용된다.

$$DN=WNO3*(1.-\exp(-1.4*TFN*WOC)); SWF>0.95 \quad (161)$$

$$DN=0.0; SWF<0.95 \quad (161a)$$

DN은 탈질률($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)이고, TFN는 양분순환 온도계수, WOC는 유기탄소 농도(%), SWF는 토양수 인자이다. 온도 인자는 다음의 식으로 표현된다.

$$TFN=STMP/(STMP+\exp(5.059-0.2504*STMP)) \quad (162)$$

여기서 STMP는 토양층 중앙의 토양온도($^{\circ}\text{C}$)이다. 다음의 식에서 토양수 인자는 총 토양수를 감안하여 구해진다.

$$SWF=0.1*(ST/WP)^2; ST<WP \quad (163)$$

$$SWF=0.1+0.9*\sqrt{((ST-WP)/(FC-WP))}; ST>WP \quad (163a)$$

탄소와 질소의 순환 및 변화(Carbon and nitrogen cycling and transformations)

APEX 모델은 토양내 탄소와 질소의 복합 순환을 모의하기 위해 EPIC 모델에서 개발된 토양 유기물 모델을 활용한다(Izaurrealde 등, 제출). EPIC 모델에서 토양 유기물 모델은 Parton 등(1987, 1993, 1994)과 Vitousek 등(1994)이 보고한 Century 모델에서 사용된 접근법을 사용한다. 이러한 접근법을 통해 토양 유기물에 포함된 탄소와 질소는 3가지 구획, 즉 미생물(또는 활성), 저속 및 수동 구획으로 나뉘게 된다. 크기 및 작용의 차이 뿐만 아니라 이 3가지 구획은 수일에서 수백년에 이르는 전이시간의 차이를 보인다. 또한 탄소와 질소는 기체형태로 침출되거나 유실될 수 있다. 토양 표면 또는 지하에 추가된 유기 잔사(작물 잔사, 뿌리 및 가축분뇨)는 질소 및 리그닌 함량에 따라 2가지(물질 대사 및 구조적) 낙엽 구획으로 나뉜다.

유기 변환과 관련하여 Century와 EPIC 모델은 4가지의 주요한 차이를 보인다. 첫째, EPIC 모델에서 현재 사용되는 침출식은 유기물을 표면 낙엽에서 지표아래층으로 이동시키기 위해서 사용된다. 둘째, 변환을 영향을 미치는 온도와 수분 제어 방법은 현재 EIPC 모델에서 사용되는 식을 이용하여 계산된다. 셋째, EPIC 모델에서 표면 낙엽 분획은 저속 구획을 가지지만 수동 구획은 없다. 마지막으로, EPIC 모델에서 리그닌 함량은 작물 나이의 시그모이드 함수로써 모형화된다.

낙엽 할당과 잠재적인 탄소와 질소 변환(Litter allocation and potential C and N transformations)

우선 EPIC 모델은 기재별 속도 상수, 온도와 수분 함량에 기반한 잠재 변환량을 산출한다. 리그닌 함량과 토성 또한 이러한 변환 과정에 어느 정도 영향을 준다(예: 구조적 낙엽 및 바이오매스). 이러한 변환과정은 충분한 양의 유기 및 비유기성 질소가 존재할 경우에만 완료될 수 있기 때문에 잠재적인 것으로 간주된다. 다음은 토양탄소와 질소의 잠재적인 변환을 산출하기 위한 식에 대한 설명이다.

유기 잔사가 토양에 추가되었을 때 토양의 미네랄 질소의 일부분이 낙엽의 질소 구획(STDNE)으로 흡착된다(Parton 등, 1987).

$$STDNE=STDN+Sf*(WNO3+WNH3); CNR \geq 10 \quad (164)$$

$$STDNE=STDN; CNR < 10 \quad (164a)$$

물질대사(LMF)와 구조적 낙엽(LSF) 구획을 산출하여 그 후에 낙엽 구획은 물질대사성(LM)과 구조적(LS) 구획으로 나뉘게 된다(Parton 등, 1987).

$$LMF=0.85-0.018*STD/STDNE; STD/STDNE<47.22 \quad (165)$$

$$LMF=0.0; STD/STDNE=47.22 \quad (165a)$$

$$LSF=1.0-LMF \quad (166)$$

$$LM=LMF*STD \quad (167)$$

$$LS=LSF*STD \quad (168)$$

그 다음에 죽어있는 작물의 리그닌 전부(STD)는 구조적 낙엽으로 이동된다(Parton 등, 1987).

$$LSL=STD \quad (169)$$

$$LSLF=LSL/LS \quad (170)$$

구조적 낙엽은 150의 C/N 비율을 할당받는다(Parton 등, 1987). 탄소의 질량(LSC)과 질소의 질량(LSN) 및 구조적 낙엽의 질소분획(LSNF)은 다음과 같이 산출된다.

$$LSC=Cf*LSF*STD \quad (171)$$

$$LSN=LSC/150; STDNE > LSC/150 \quad (172)$$

$$LSN=STDNE; STDNE < LSC/150 \quad (172a)$$

$$LSNF=LSN/LS \quad (173)$$

여기서 Cf은 유기물의 탄소분획이다.

비슷하게도 탄소의 질량(LMC)과 질소의 질량(LMN) 및 대사성 낙엽의 질소분획(LMNF)은 다음과 같이 산출된다.

$$LMC=Cf*LM \quad (174)$$

$$LMN=STDNE-LSN \quad (175)$$

$$LMNF=LMN/LM \quad (176)$$

지표 및 지표아래에서의 구조적 낙엽(LSCTP)에 존재하는 탄소의 잠재적인 변환은 구조적 낙엽(LSC), 최적의 조건에서 구조적 낙엽의 잠재적인 변환 비율, 구조적 낙엽의 리그닌 분획의 제어(X_{LSLF} , 식 178)와 생물학적 과정에 대해 온도(TFN, 식

162), 토양수분 함량(SWF, 식 163), 산소(OX, 식 179a) 그리고 경운(TBP, 식 179b)의 영향을 나타내는 복합 인자에 따라 식 177에서 계산된다. 복합 인자 CS는 Century 모델에서 사용된 분해에 대한 온도 및 수분 제어 방식과는 차이가 있다.

$$LSCTP=LSC*LSR*X_{LSLF}*CS \quad (177)$$

$$X_{LSLF}=\exp(-3*LSLF) \quad (178)$$

$$CS=\sqrt{\text{TFN}*SWF}*0.8*OX*TBA; CS < 10 \quad (179)$$

$$OX=1.0-0.9*Z_5/(Z_5+\exp(16.79-0.0196*Z_5)) \quad (179a)$$

$$TBP=\exp(6.0*(BD-BDP)) \quad (179b)$$

구조적 낙엽(LSLCTP)의 리그닌 내에 존재하는 탄소의 잠재적인 변환은 구조적 낙엽의 비리그닌 구성요소에서 탄소(LSLNCTP)와 질소(LSNTP)의 잠재적 변환이 식 181과 182를 통해 산출되는 동안 식 180을 통해 산출된다.

$$LSLCTP= LSCTP*LSLF \quad (180)$$

$$LSLNCTP= LSCTP*(1-LSLF) \quad (181)$$

$$LSNTP=LSN*(LSCTP/LSC) \quad (182)$$

대사성 낙엽은 (활성)미생물로 변환되거나(지표=0.40; 지표아래=0.45) 수분 인자를 곱한 온도 인자의 제어 하에 CO₂(지표=0.60; 지표아래=0.55)로 변환된다. 대사성 낙엽의 잠재적인 질소와 탄소 변환율은 다음과 같다(Parton 등, 1994).

$$LMCTP=CS*LMR*LMC \quad (183)$$

$$LMNTP=LMN*(LMCTP/LMC) \quad (184)$$

여기서 LMR은 최적 조건하에서 대사성 낙엽의 변환율이다.

미생물 바이오매스 탄소와 질소의 잠재적인 변환율을 구하기 위한 식은 다음과 같다(Parton 등, 1994)

$$BMCTP=BMC*BMR*CS*XBMT \quad (185)$$

$$BMNTP=BMN*(BMCTP/BMC) \quad (186)$$

느린 부식토 구획의 잠재적인 변환은 다음과 같다(Parton 등, 1993; 1994; Vitousek 등, 1994).

$$HSCTP=HSC*HSR*CS \quad (187)$$

$$HDNTP=HSN*(HSCTP/HSC) \quad (188)$$

지표아래층에서 수동 부식 암반의 변환은 다음과 같다(Parton 등, 1993; 1994).

$$HPCTP=HPC*HPR*CS \quad (189)$$

$$HPNTP= HPN*(HPCTP/HPC) \quad (190)$$

바이오매스에서 침출(ABL)로의 할당량은 EIPC 모델에서 Williams(1995)의 식에 의한다.

$$ABL=BMC*(1.0-\exp(-QV/(0.01*ST+0.1*KdBM*BD))) \quad (191)$$

여기서 BMC는 토양의 미생물 바이오매스 내에 존재하는 탄소와 관련 산물의 중량(kg ha⁻¹), ABL은 침출된 탄소량(kg ha⁻¹), QV는 수직 유동(mm), ST는 토양층에 저장된 수분량(mm), KdBD는 바이오매스에 대한 선형 흡착 계수, BD는 토양층의 용적중(t m⁻³)을 의미한다.

실제 탄소 및 질소 변환(Actual C and N trnasformations)

실제 탄소와 질소 변환은 각 잠재적 변환에서 이용 가능한 질소 공급량에 기반하여 산출된다. 질소에 대한 수요는 공급원 구획의 잠재적인 탄소 변환과 수용원 구획의 C/N 비율에 의해 설정된다. 수용원 구획의 C/N 비율은 기질과 토양의 상태에 따라 달라진다(Parton 등, 1993; Vitousek 등, 1994). 예를 들어 지표면 낙엽(NCBM)에서 형성된 바이오매스의 C/N 비율은 분해 중인 물질의 질소 함량에 대한 1차 함수(Nf=100×STDNE/STD)로 계산된다(Parton 등, 1993).

$$NCBM=1.0/(-5.0251*Nf+20.05); 2.0 \geq Nf \geq 0.01 \quad (192)$$

$$NCBM=0.05; Nf < 0.01 \quad (192a)$$

$$CBM=0.1; Nf > 2.0 \quad (192b)$$

지표면의 미생물에서 형성된 느린 부식토의 N/C 비율(NCHS)은 지표면 미생물보다 5 단위가 더 크다(Parton 등, 1993). 지표아래 낙엽에서 형성된 바이오매스, 저속 부식토와 수동 부식토(NCHP)의 N/C 비율은 토양의 미네랄 질소 함량(MINT)에 따라 계산된다. 바이오매스의 경우 N/C 비율은 다음과 같이 계산된다.

$$NCBM=1/(b*MINT+a); MINT \leq 20 \text{ kg ha}^{-1} \quad (193)$$

$$NCBM=0.33; MINT > 20 \text{ kg ha}^{-1} \quad (194)$$

계수 *b*와 *a*의 값은 각각 0.6와 15이다. 따라서 NCHS에 대한 계수값은 -0.4와 20이며, 반면 NCHP의 경우는 -0.15와 10이다. MINT>20 kg ha⁻¹일 때, NCHS 값은

0.083인데 반해 NCHP의 경우는 0.143이다.

그런 다음 모든 잠재적인 이동(PT)과 관련하여 질소(PN)에 대한 수요가 산출되고 질소 공급량과 비교된다. 모든 수용원 구획에서 이용가능한 질소가 공급량을 초과할 때 잠재적인 변환량이 실제 변환량이 된다. 따라서 계산된 질소와 탄소의 흐름은 수용원 구획에 추가되고 공급원 구획에서 빠지게 된다.

$$PT_1: \text{구조적 낙엽} \rightarrow \text{바이오매스} \quad PN_1 = LSLNCTP * (1 - ALSL_{CO_2}) * NCBM \quad (195)$$

$$PT_2: \text{구조적 낙엽} \rightarrow \text{저속} \quad PN_2 = LSLCTP * (1 - ALSL_{CO_2}) * NCHS \quad (196)$$

$$PT_3: \text{대사성 낙엽} \rightarrow \text{바이오매스} \quad PN_3 = LMCTP * (1 - ALM_{CO_2}) * NCBM \quad (197)$$

$$PT_4: \text{바이오매스} \rightarrow \text{침출} \quad PN_4 = BMCTP * ABL * NCBM \quad (198)$$

$$PT_5: \text{바이오매스} \rightarrow \text{수동} \quad PN_5 = BCTP * ABP * NCHP \quad (199)$$

$$PT_6: \text{바이오매스} \rightarrow \text{저속} \quad PN_6 = BMCIP * (1 - ABL - ABP - ABCO_2) * NCHS \quad (200)$$

$$PT_7: \text{저속} \rightarrow \text{바이오매스} \quad PN_7 = HSCTP * (1 - ASCO_2 - ASP) * NCBM \quad (201)$$

$$PT_8: \text{저속} \rightarrow \text{수동} \quad PN_8 = HSCTP * ASP * NCHP \quad (202)$$

$$PT_9: \text{수동} \rightarrow \text{바이오매스} \quad PN_9 = HPCTP * (1 - APCO_2) * NCBM \quad (203)$$

$$PT_{10}: \text{작물 수요량} \quad PN_{10} = UNDP(UND, Williams, 1995) \quad (204)$$

$$\text{총 질소 수요량}(NP_T) \quad NP_T = \sum PN_i \quad (205)$$

질소 무기화(NMIN) 또는 부동화(경쟁력 있는) 잠재력(CPN)은 구조적 낙엽(LSNTP)내 질소의 잠재적인 변환과 $LSNTP \geq PN_1 + PN_2$ 조건 하에서의 변환(PN_1 과 PN_2) 과정에 대한 잠재적인 순수요 사이에 존재하는 차이로 질소 변환 각각(예: 구조적 낙엽에서 바이오매스까지의 질소, $NMIN_1$)에 대한 값이 산출된다(식 206). 그렇지 않으면 본 모델은 다른 변환 과정에서 경쟁해야 하는 질소의 양을 산출한다(CPN_1).

$$NMIN_1 = LSNTP - (PN_1 + PN_2); \quad LSNTP \geq (PN_1 + PN_2) \quad (206)$$

$$CPN_1 = PN_1 + PN_2 - LSNTP; \quad LSNTP < (PN_1 + PN_2) \quad (206a)$$

물질대사성 낙엽에서 바이오매스($NMIN_2$, CPN_2), 바이오매스 회전율($NMIN_3$, CPN_3), 느린 회전율($NMIN_4$, CPN_4) 및 수동 회전율($NMIN_5$, CPN_5)에 이르는 질소 변환에 대한 유사한 계산이 이루어진다.

$$NMIN_2 = LMNTP - PN_3; \quad LMNTP \geq PN_3 \quad (207)$$

$$CPN_2 = PN_3 - LMNTP; \quad LMNTP < PN_3 \quad (207a)$$

$$NMIN_3=BMNTP-PN_4+PN_5+PN_6; \quad BMNTP \geq PN_4+PN_5+PN_6 \quad (208)$$

$$CPN_3=PN_4+PN_5+PN_6-BMNTP; \quad BMNTP < PN_4+PN_5+PN_6 \quad (208a)$$

$$NMIN_4=HSNTP-PN_7+PN_8; \quad HSNTP \geq PN_7+PN_8 \quad (209)$$

$$CPN_4=PN_7+PN_8-HSNTP; \quad HSNTP < PN_7+PN_8 \quad (209a)$$

$$NMIN_5=HPNTP-PN_9; \quad HPNTP \geq PN_9 \quad (210)$$

$$CPN_5=PN_9-HPNTP; \quad HPNTP < PN_9 \quad (210a)$$

모든 부분에서 질소 변환(NMIN_i)의 합으로 식 211을 이용하여 총 질소 무기화(NMING)에 대한 계산이 이루어진다. 질소(SUMP)에 대한 총 순수 경쟁적 수요는 스스로 질소를 공급할 수 없는 작물의 섭취량(CPN₆=PN₁₀)을 포함하는 변환 과정에 대한 모든 수요의 합으로써 계산된다.

$$NMING=\sum NMIN_i \quad (211)$$

$$SUMP=\sum CPN_i \quad (212)$$

그리고 나서 SUMP는 이용 가능한 광물 N과 비교된다(MINTMP). 만약 SUMP ≤ MINTMP일 경우 각 순 질소의 수요가 충족된다. 따라서 각 잠재적인 변환은 실제로 변환된다. SUMP > MINTMP일 때 총 질소 수요는 이용 가능한 광물 질소량을 초과한다. 따라서 본 모델에서는 순수 수요 및 각 잠재적 변환에 대한 비례적인 감소값을 산출한다(식 213).

$$CPN_i=CPN_i/SUMP*MINTMP \quad (213)$$

작물의 질소 흡수율(CPN₆)을 제외한 모든 재산출된 CPN_i의 합을 질소 부동화(NIMMOB)라 한다(식 214). 순 질소 무기화(NMINET) 과정은 식 215로 계산된다.

$$NIMMOB=\sum CPN_i \quad (214)$$

$$NMINET=NMING-NIMMOB \quad (215)$$

그 다음 본 모델은 질소 이용 가능성에 기반해서 실제 탄소와 질소 변환을 산출한다. CPN_i=0일 경우 각 잠재 변환량(예: LSCTP)은 실제 변환량(LSCTA)이 된다. CPN_i>0일 경우, 실제 변환량은 식 216~228을 통해 다시 산출된다.

$$LSCTA=LSCTP*CPN_1/(PN_1+PN_2-LSNTP) \quad (216)$$

$$LSLCTA=LSLCTP*LSCTA/LSCTP \quad (217)$$

$$\text{LSLNCTA}=\text{LSLNCTP}*\text{LSCTA}/\text{LSCTP} \quad (218)$$

$$\text{LSNTA}=\text{LSNTP}*\text{LSCTA}/\text{LSCTP} \quad (219)$$

$$\text{LMCTA}=\text{LMCTP}*CPN_2/(PN_3-\text{LMNTP}) \quad (220)$$

$$\text{LMNTA}=\text{LMNTP}*\text{LMCTA}/\text{LMCTP} \quad (221)$$

$$\text{BMCTA}=\text{BMCTP}*CPN_3/(PN_4+PN_5+PN_6-\text{BMNTP}) \quad (222)$$

$$\text{BMNTA}=\text{BMCTA}/\text{BMCTP} \quad (223)$$

$$\text{HSCTA}=\text{HSCTP}*CPN_4/(PN_7+PN_8-\text{HSNTP}) \quad (224)$$

$$\text{HSNTA}=\text{HSNTP}*\text{HSCTA}/\text{HSCTP} \quad (225)$$

$$\text{HPCTA}=\text{HPCTP}*CPN_5/(PN_9-\text{HPNTP}) \quad (226)$$

$$\text{HPNTA}=\text{HPNTP}*\text{HPCTA}/\text{HPCTP} \quad (227)$$

$$\text{UND}=\text{CPN}_6 \quad (228)$$

마지막으로 모든 구획이 해당 일에 발생한 실제 변환에 근거한 탄소와 질소 함량에 따라 업데이트된다. 업데이트는 다른 구획에서 탄소를 이산화탄소에 할당할 때 호흡 기간(RSPC)의 산출과정을 포함한다. 다른 구획에 대한 할당 값은 본 기술서의 마지막 ‘축약어’ 부분에서 다뤄진다. 또한 침출로 인한 유기 탄소와 질소의 이동도 계산된다.

토양 용적비중과 토양층 깊이의 역학관계(Dynamics of soil bulk density and layer depth)

토양의 유기물 함량은 BD에 강한 영향력을 갖는다. EPIC 모델(Izaurrealde 등, 제출)처럼 APEX 모델은 수정된 Adams(1973) 식을 사용하여 토양 유기물 탄소(WOC)의 함량 변화로 BD의 연간 변화를 산출한다.

$$\text{BD}=100/((\text{WOC}*1.724/0.244)+((100\pm\text{WOC}*1.724)/\text{BDM})); \quad (229)$$

$$0\leq\text{WOC}<58$$

$$\text{BD}=0.244; \quad \text{WOC} > 58 \quad (229a)$$

토양 유기물의 BD가 상당히 균일한 수준을 보이는 반면(0.244 t m^{-3}), 광물의 용적비중(BDM)은 불안정하고 잘 알려져 있지 않다. 이러한 문제를 피하기 위해 APEX 모델은 초기 구동시 BD와 WOC값에 기반하여 BDM을 예측한다. BD값은 각 층에 대한 새로운 WOC값에 근거해 해마다 업데이트된다. 토양 질량을 일정하게 유지하기 위해 각 토양층의 깊이에 대해 조정이 이루어진다.

질산화(Nitrification)

질산화는 암모니아 질소를 질산태 질소로 전환하는 과정으로서 Reddy 등(1979)과 Godwin 등(1984)이 제시한 방법을 결합하여 측정된다. 이러한 접근법은 Reddy 등의 1차 운동 비율 공식에 기반해 이루어진다.

$$RNV = WNH_3 * (1.0 - \exp(-AKN - AKV)) \quad (230)$$

$$AKN = TF * SWF' * PHF \quad (230a)$$

$$TF = 0.041 * (STMP - 5.0); STMP > 5.0 \quad (230b)$$

$$WF' = \max(0.1, SWF, (ST - WP) / (ST_{25} - WP)); ST < ST_{25} \quad (230c)$$

$$SWF' = 1.0; ST_{25} < ST < FC \quad (230d)$$

$$WF' = \max(0.1, 1.0 - (ST - FC) / (PO - FC)); ST > FC \quad (230e)$$

$$PHF = 0.307 * PH - 1.269; PH < 7.0 \quad (230f)$$

$$PHF = 1.0; 7.0 < PH < 7.4 \quad (230g)$$

$$PHF = 5.367 - 0.599 * PH; PH > 7.4 \quad (230h)$$

여기서 RNV는 결합된 질산화와 휘산화 과정($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)이고, WNH_3 은 NH_3 중량(kg ha^{-1}), AKN는 질산화 레귤레이터, AKV는 휘산화 레귤레이터, STMP는 토양 온도($^{\circ}\text{C}$), ST는 토양수분 함량, WP는 위조점의 토양수분 함량, FC는 포장용수량의 토양수분 함량, ST_{25} 는 $WP + 0.25(FC - WP)$ 에서의 수분 함량, PH는 토양 pH이다. SWF값은 식 163에서 얻어진다.

휘산작용(Volatilization)

암모니아를 대기로 유실하는 과정이 휘산화 과정인데 이는 질산화 과정과 동시에 산출된다. 표면에 적용된 암모니아의 휘산은 다음의 식으로 온도와 풍속의 함수로 산출된다.

$$AKV = TF * WNF; \text{ surface soil layer} \quad (231)$$

$$WNF = 0.335 + 0.16 * \ln(U10 + 0.2) \quad (231a)$$

$$AKV = TF * FCEC * FZ; \text{ all other layers} \quad (232)$$

$$FCEC = 1.0 - 0.038 * CEC; FCEC > 0.0 \quad (232a)$$

$$FZ = 1.0 - Z_5 / (Z_5 + \exp(4.55 - 0.00054 * Z_5)) \quad (232b)$$

여기서 WNF는 지표면(토양층 1) 시용을 위한 풍속 인자이고, U10은 평균 풍속(m s^{-1}), CEC는 양이온 교환능, Z_5 는 토양층 중간까지의 깊이(mm)이다. 질산화와 휘산율을

적절하게 구분하기 위해 각 과정마다 식 230을 따로 풀어 합치면 다음과 같은 결과를 갖게 된다.

$$RVOL = RNV * F1 / (F1 + F2) \quad (233)$$

$$F1 = 1.0 - \exp(-AKV) \quad (233a)$$

$$F2 = 1.0 - \exp(-AKN) \quad (233b)$$

$$RNIT = RNV - RVOL \quad (233c)$$

여기서 RNIT와 RVOL은 질산화률과 휘산률($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)이다.

강우(Rainfall)

강우로부터 질소 기여도를 예측하기 위해 APEX 모델은 한 지역에서 모든 강우에 대한 강우 중 평균 질소 농도를 사용한다. 강우 중 질소량은 강우량에 농도를 곱하여 예측할 수 있다.

2.5.2 인(Phosphorus)

지표 유거수 내 용존성 인 유실(Soluble P loss in surface runoff)

APEX 모델의 접근법은 Leonard와 Wauchope(Knise, 1980)가 제안한대로 농약의 용액과 퇴적물 형태로 구분하는 개념에 근거한다. 인은 대개 퇴적물 형태와 관련이 있기 때문에 용존성 인의 유출수 식은 다음과 같이 단순하게 표현된다.

$$YSP = 0.01 * CSP * Q / KD \quad (234)$$

여기서 YSP는 유출량 Q(mm)에서 유실되는 용존성 인(kg ha^{-1}), CSP는 토양층 1에 존재하는 불안정한 인의 농도(g t^{-1}), KD는 물 중 P 농도를 유사 중 P 농도로 나눈 값($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)이다. APEX 모델에서 사용되는 KD 값은 100이다.

유사에 의한 인 이동(P transport by sediment)

유사에 의한 인의 이동은 유기 질소 이동에서 논의된 것처럼 부하 함수에 의해 모의된다. 인 부하 함수는 다음과 같다.

$$YP = 0.001 * Y * CP * ER \quad (235)$$

여기서 YP는 유거수에서 유실되는 퇴적물 형태의 인(kg ha^{-1})이고 CP는 표토 중 P 농도(g t^{-1})이다.

무기화(Mineralization)

Jones 등(1984)이 개발한 무기화 모델은 PAPRAN 무기화 모델(Seligman과 van Keulen, 1981)을 수정된 버전이다. 본 모델에서는 무기화 과정의 2가지 공급원이

고려되는데, 작물 잔사 및 미생물 바이오매스와 관련된 유기 인 공급원과 토양 부식과 관련된 안정된 유기 인 공급원이다. 각 토양층의 신선한 유기 인 공급원에서 무기화 과정은 다음의 식을 통하여 예측할 수 있다.

$$RMP=DECR*FOP \quad (236)$$

$$DECR=0.05*CPRF*CS \quad (236a)$$

$$CPRF=\exp(-.693*(CPR-200.)/200.) \quad (236b)$$

$$CPR=580*RSD/(FOP+WPML) \quad (236c)$$

여기서 RMP는 신선한 유기 인의 무기화률(kg ha⁻¹ d⁻¹), DECR는 신선한 유기 인의 붕괴 상수(d⁻¹), FOP는 작물 잔사내 신선한 유기 인(kg ha⁻¹), CS는 생물학적 과정 제어 인자, RSD는 작물 잔사(t ha⁻¹), WPML은 불안정한 인 함량(kg ha⁻¹)이다.

부식토와 관련된 유기 인의 무기화 과정은 다음의 식으로 예측할 수 있다.

$$HMP=CMP*CS*WPO \quad (237)$$

여기서 HMP는 부식토의 인 광물화률(kg ha⁻¹ d⁻¹), CMP는 부식토의 무기화 속도 상수(0.0003 d⁻¹), WPO는 유기 인 농도(kg ha⁻¹)이다. 하루가 끝나는 시점에 인의 균형 상태를 유지하기 위해서 부식토 무기화는 유기 인 공급원에서 제외되고, 잔사 무기화는 FOP 공급원에서 제외되고, RMP의 20%는 WPO 공급원에 더해지고, RMP의 80%는 WPML에 더해진다.

미네랄 인의 순환(Mineral P cycling)

미네랄 인 모델은 Jones 등(1984)이 개발한 모델이다. 미네랄 인은 3가지 공급원 중에서 이동되는데 불안정, 활성 미네랄 및 안정된 미네랄 공급원이 그것이다. 비료 인은 적용시 불안정하지만(식물에 사용가능) 활성 미네랄 공급원으로 신속하게 이동할 수 있다. 불안정과 활성 미네랄 공급원 간의 유동은 다음의 평형 방정식을 통해 제어할 수 있다.

$$MPR=WPML-WPMA*PSP/(1.-PSP) \quad (238)$$

여기서 MPR은 광물 인의 유동률(kg ha⁻¹ d⁻¹), WPMA는 활성 미네랄 인 공급원의 양(kg ha⁻¹), PSP는 초기 빠른 인의 흡착 단계가 완료된 이후 불활성 공급원에 남아있는 비료 인의 분획으로 규정된 인 흡착 계수이다.

식 238로 산출된 인의 1일 양은 활성 미네랄 인 공급원으로 이동하고 그 결과로 해당 공급원에 합쳐지고 불완전 공급원에서 제외된다. 분명한 것은 불활성 인이 WPMA*PSP/(1-PSP) 이하일 때 해당 흐름은 역전된다는 것이다. 이러한 역흐름은 속도가 훨씬 느리기 때문에 MPR 결과가 음수일 경우 식 238에 0.1을 곱한다. 인 흡착 계수는 다음의 식에서 설명한 것처럼 토양의 화학 및 물리적 특성에 달려있다.

석회질 토양에서,

$$PSP=0.58-0.0061*CAC \quad (239)$$

낮은 수준으로 풍화된 비석회질 토양에서,

$$PSP=0.02+0.014*WPML \quad (240)$$

보통 수준의 풍화를 겪은 비석회질 토양에서

$$PSP=0.0054*BSA+0.16*PH-0.73 \quad (241)$$

높은 수준으로 풍화된 비석회질 토양에서

$$P=0.46-0.0916\ln(CLA) \quad (242)$$

여기서 PSP는 인 흡착 계수, CAC는 $CaCO_3$ 농도($g\ t^{-1}$), PH는 토양 pH, CLA는 토양 점토 함량(%), BSA는 초산암모늄(NH_4OAc)에 의한 염기 포화도(%)이다. PSP는 $0.05 < PSP < 0.75$ 범위 내로 제한된다. 평형 상태에서 안정된 인 공급원은 활성 인의 공급원보다 4배 정도 큰 것으로 간주된다. 인 공급원간에 일어나는 유동은 다음의 식을 통해 제어된다.

$$ASPR=bo*(4.0*WPMA-WPMS) \quad (243)$$

여기서 ASPR은 활성 및 안정된 미네랄 인 공급원간의 유동률($kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$), bo는 유동 계수(d^{-1}), WPMS는 안정된 미네랄 인의 양($kg\ ha^{-1}$)이다. 식 243을 통해 산출된 1일 인의 양은 안정된 공급원으로 흘러들어가고 활성 공급원에서 빠지게 된다. $WPMS > 4*WPMA$ 일 때 해당 유동은 반대로 일어나게 된다. 이러한 역흐름은 훨씬 낮은 속도로 일어나기 때문에 ASPR 결과가 음수일 경우 식 243에 0.1을 곱한다. 유동계수 bo는 다음의 식에서 표현된 것처럼 PSP의 함수이다(Jones 등, 1984).

비석회질 토양의 경우에는

$$bo+\exp(-1.77*PSP-7.05) \quad (244)$$

석회질 토양의 경우에는

$$bo=0.0076 \quad (245)$$

2.6 농약 거동(Pesticide Fate)

유출수, 여과액, 토양 증발 및 유사에 의한 농약의 이동을 모의하기 위한 GLEAMS(Leonard 등, 1987) 모델이 APEX 모델에 추가되었다. 농약은 언제라도 필요한 만큼 작물의 잎이나 필요한 깊이만큼 토양의 표면 아래에 시용될 수 있다. 농약이

적용되었을 때 대기 중으로 어느 정도 유실이 발생한다. 따라서 토양 또는 작물에 도달하는 양은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{PAPE}=\text{PAPR}*\text{PAEF} \quad (247)$$

여기서 PAPE는 적용된 농약의 유효량이다(g ha^{-1}). PAPR은 실제 사용된 양(g ha^{-1})이며, PAEF는 적용 효율 인자이다.

얼마나 많은 농약이 토양에 도달하는지 판단하기 위해 작물에 의한 피복정도를 다음의 식으로 산출할 수 있다.

$$\text{GC}=(1.0-\text{erfc}(1.33*\text{LAI}-2.))/2.0 \quad (248)$$

여기서 GC는 작물로 덮인 토양의 분획, LAI는 엽면적 지수이다. 따라서 농약의 적용은 다음의 식으로 작물 및 토양 표면으로 구분되어 이루어진다.

$$\text{FP}=\text{GC}*\text{PAPE} \quad (249)$$

$$\text{GP}=\text{PAPE}-\text{FP} \quad (250)$$

FP는 작물에 의해 차단되는 농약의 양(g ha^{-1})이고, GP는 토양에 도달하는 양(g ha^{-1})이다.

작물의 잎에 남아있는 농약은 강우에 의해 씻겨나갈 수 있다. 잠재적으로 제거 가능한 농약의 일부는 임계 강우량이 초과되었을 때 작물에서 씻겨나간다. 본 모델은 2.5 mm의 임계값을 사용하고 다양한 종류의 농약에 대한 잠재적인 씻김 정도가 예측되어 왔다(Leonard 등, 1987). 씻김 정도를 계산하는 적절한 식은 다음과 같다.

$$\text{WO}=\text{WOF}*\text{FP}; \text{RFV}>2.5\text{mm} \quad (251)$$

$$\text{WO}=0.0; \text{RFV}<2.5\text{mm} \quad (251a)$$

WO는 강우 RFV에 의해 작물에서 씻겨나가는 농약의 양(mm), WOF는 특정 농약의 씻김량이다. 씻겨나간 농약은 GP에 더해지고 FP에서 제외된다.

작물과 토양 내에 존재하는 농약은 다음의 부식 방정식에 의해 시스템에서 유실된다.

$$\text{GP}=\text{GP}_0*\exp(-0.693/\text{HLS}) \quad (252)$$

$$\text{FP}=\text{FP}_0*\exp(-0.693/\text{HLP}) \quad (253)$$

여기서 GP_0 와 GP는 토양에 존재하는 초기 및 최종 농약의 양을 의미하며, FP_0 와 FP는 작물에 존재하는 초기 및 최종 농약의 양, HLS는 토양에 존재하는 농약의 반감기(일), HLP는 엽면 잔류량의 반감기(일)이다. 다양한 농약에 대한 HLP와 HLS 값이 설정되었다(Leonard 등, 1987).

농약이 유실될 수 있는 또 다른 방법은 침출이다. 여기서 사용되는 GLEAMS 모델의 침출 구성 요소는 약간 변경되었다. 토양층에 포함된 농약 양의 변화는 시간, 농도, 해당 층으로부터의 유동량과 함수 관계에 있다.

$$dGP/dt=PSQC*q \quad (254)$$

여기서 GP는 t 동안의 토양층 내에 존재하는 농약의 양, PSQC는 물 속에 존재하는 농약의 농도($g\ t^{-1}$)이고 q는 해당 층으로의 물 유동률($mm\ h^{-1}$)이다. 토양층에 포함된 층 농약의 양은 흡착과 이동 단계의 합이다.

$$GP=0.01*PSQC*ST+0.1*PSYC*BD \quad (255)$$

여기서 ST는 토양층에 저장된 수분량(mm), PSYC는 흡수된 농약의 농도($g\ t^{-1}$), BD는 토양의 용적비중($t\ m^{-3}$)이다. 그동안 다양한 농약에 대한 흡수된 농약 농도와 물 속에 존재하는 농약의 농도 비를 예측하려는 노력이 이루어져왔고(Leonard 등, 1987) 이는 다음의 식으로 표현된다.

$$KD=PSYC/PSQC \quad (256)$$

여기서 KD는 분배 상수($m^3\ t$)이다. KD 값은 다음의 식으로 산출된다.

$$KD=0.01*KOC*WOC \quad (257)$$

여기서 KOC는 유기 탄소에 대한 선형 흡착 계수이고, WOC는 토양층 내의 유기 탄소(%)이다.

식 257을 식 255로 대체하면 다음과 같다.

$$GP=0.01*PSQC*ST+0.1*PSQC*KD*BD \quad (258)$$

PSQC를 구하기 위해 식 258을 해결하는 과정은 다음과 같다.

$$PSQC=GP/(0.01*ST+0.1*KD*BD) \quad (259)$$

식 259의 PSQC를 식 254로 대체하면 다음과 같다.

$$dGP/dt=GP*q/(0.01*ST+0.1*KD*BD) \quad (260)$$

식 260을 다시 정리하고 통합하면 해당 구역으로 흐르는 물의 양에 따라 농약의 양을 표현하는 다음의 공식을 얻게 된다.

$$GP=GP0*\exp(-QT/(0.01*ST+0.1*KD*BD)) \quad (261)$$

여기서 GP0는 토양층 내에 존재하는 초기 농약의 양($g\ ha^{-1}$)이고, GP는 유동량(QT, mm)이 해당 구역으로 들어간 후 남아있는 양, ST는 초기 수분 저장량(mm)이다. 수분량 QT에 의해 침출된 농약의 양을 구하기 위하여 다음의 식으로 GP는 GP0로부터 빼도록 한다.

$$PSTL=GP0*(1.0-\exp(-QT/(0.01 *ST+0.1 *KD*BD))) \quad (262)$$

여기서 PSTL은 QT에 의해 침출된 농약의 양이다. QT의 삼투과정 중 평균 농도는 다음과 같다.

$$PSTC=PSTL/QT \quad (263)$$

삼투과정은 보통 유거수 이전에 시작되기 때문에 보통 수직 유동 농도는 수평 유동보다 높은 편이다. 상대 농도는 사용자가 매개변수 p24로 지정할 수 있다.

$$p24=PCH/PCV \quad (264)$$

여기서 p24는 거의 0.0~1.0의 범위(보통 0.5)에 있는 매개변수, PCH는 수평 농도, PCV는 수직 농도이다. PSTL는 다음의 식으로 수직 및 수평 구성 요소로 구분된다.

$$PSTL=PCV*QV+PCH*QH \quad (265)$$

식 264를 식 265로 대체하고 PCV를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$PCV=PSTL/(QV+p24*QH) \quad (266)$$

$$PCH=p24*PCV \quad (266a)$$

유출수, 측면 유동, 빠른 복귀류에 포함된 PSTL의 양과 수평 관내 유동은 유동 구성요소와 PCH의 곱으로 예측할 수 있다. 삼투 및 수직 관내 유동 부하는 비슷한 방식으로 PCV를 사용하여 예측할 수 있다.

유거수로 유실되는 농약의 총 양은 식 262에서 266을 통해 산출된 가용성 분획을 더하여 예측할 수 있다. 흡착상태의 농약 유출량은 농축비율 식을 통해 산출할 수 있다.

$$PSTY=0.001*Y*PSYC*ER \quad (267)$$

여기서 PSTY는 유사내로 흡수된 농약의 유출량($g\ ha^{-1}$), ER은 식 158을 통해 계산된 농축비율(퇴적물 내 농약 농도÷토양 표면 10 mm 내의 농약 농도)이다. 토양내의 농약 농도는 식 257을 식 259로 대체하고 PSYC를 구하여 얻을 수 있다.

$$PSYC=KD*GP/(0.01*ST+0.1*KD*BD) \quad (268)$$

적은 저장량을 가진 토양층은 단지 삼투량이 더 크기 때문이 아니라 저장량 변위가 더 크기 때문에 높은 침출 가능성을 보인다. 낮은 KD 값과 높은 용해성을 가진 농약은 물과 함께 빠르게 이동된다. 반대로 높은 KD 값을 보이는 농약은 토양 입자에 흡착되고 대개 유사와 함께 이동한다.

2.7 토양 온도(Soil Temperature)

각 토양층 중심부의 일일 평균 토양온도는 양분 순환 및 수문학에서 이용하기 위해 모의된다. 기본 토양온도 식은 다음과 같다.

$$STMP=LAG*STMP_0+(1.0-LAG)*(FZ*(AVT-DST0)+DST0) \quad (269)$$

$$FZ=X1/(X1+\exp(-0.8669-2.0775*X1)) \quad (269a)$$

$$X1=0.5*(Z(1)+Z(1-1))/DD \quad (269b)$$

여기서 STMP는 토양층 중심부의 토양온도(°C)이고, Z는 토양층 1의 표면에서 바닥까지의 깊이(m), LAG는 어제 온도 STMP₀에 대한 적절한 가중 적용을 허용하는 0.0~1.0 사이의 계수이며, AVT는 해당 장소의 장기 평균 연간 기온이다. DST0는 토양표면 온도, DD는 m 단위의 불역층 깊이이다. 따라서 어제의 온도를 고려하여 식 269는 토양표면 온도, 깊이 및 지연 계수에 따라 오늘의 온도를 예측할 수 있다. 불역층 깊이에서 온도는 거의 일정하고 대략 AVT라고 가정된다. 식 269는 표면에 인접한 구역의 온도를 강력한 DST0의 함수로 만든다. 깊이가 증가할 때 최종적으로 AVT는 불역층 깊이에서 온도가 AVT의 5% 이내가 될 때까지 더 많은 영향을 준다.

불역층 깊이는 다음의 식에서 표현된 것처럼 토양 용적비중 및 수분함량과 함수 관계에 있다.

$$DD=DP*\exp(\ln(0.5/DP)*((1.-WC)/(1.+WC))^2) \quad (270)$$

$$DP=1.+2.5*ABD/(ABD+\exp(6.53-5.63*ABD)) \quad (270a)$$

$$WC=0.001*ST/(Z(n))*(0.356-0.144*ABD) \quad (270b)$$

여기서 DP는 해당 토양에 대한 최대 불역층 깊이(m)이고 ABD는 측면의 평균 토양 용적비중(t m⁻³)이고 n는 해당 토양단면 내 토양층의 수이며 ST는 측면에 저장된 수분량(mm)이다.

식 269를 해결하기 위해서는 표면온도를 예측해야 한다. 첫번째 단계는 나지표면의 온도를 예측하는 것이다.

$$DST=0.5*(TMX+TMN)+(TMX-TMN)*(RA*(1.0-AB)-14.)/20.) \quad (271)$$

식 271에서 첫번째 기간은 평균 일일 기온과 동일한 나지온도를 예측하는 것이다. 두번째 기간에는 온도차의 절반 수준 범위로 활용한 순 방사량을 이용하여 기본 예측치를 조정한다. 이러한 조정작업을 통해 14 MJ m⁻² d⁻¹의 순 방사량의 기호가 변한다. 토양표면이 나지가 아닌 경우 표면온도는 피복량(작물 잔사 또는 눈)에

상당한 영향을 받을 수 있다. 이러한 효과에 대한 모의를 해당 일에 예측된 나지표면 온도를 2번째 토양층의 전달 온도와 함께 합산하여 제공한다(상위 10 mm 층은 이러한 작업을 수행하기에는 너무 얇은 것으로 여겨진다).

$$DST_0 = (1. - BCV) * DST + BCV * STMP(2) \quad (272)$$

여기서 DST_0 는 토양표층 온도의 최종 예측치(°C)이고, BCV 는 잔사 및 적설 효과를 모의하기 위한 지연 인자이다. 다음 식처럼 BCV 값은 나지에서는 0.0이고 피복량이 증가할 때 1.0에 근접하게 된다.

$$BCV = \max(SNOF, BCV') \quad (273)$$

$$BCV' = CV / (CV + \exp(5.34 - 2.40 * CV)) \quad (273a)$$

$$SNOF = SNO / (SNO + \exp(2.30 - 0.220 * SNO)) \quad (273b)$$

여기서 CV 는 지상 바이오매스와 작물 잔사의 합계($t \text{ ha}^{-1}$)이고 SNO 는 적설량 내의 수분함량(mm)이다.

2.8 작물성장 모델(Crop Growth Model)

APEX 모델은 고려된 모든 작물(약 100개)에 대한 모의를 하기 위해 단일 모델을 사용한다. 물론 본 모델의 매개변수와 관련하여 각 작물은 고유한 값을 가지고 있다. APEX 모델은 단년생 작물과 다년생 작물 모두 성장을 모의할 수 있다. 단년생 작물은 파종기에서 수확기까지 또는 축적된 열량 단위가 해당 작물의 잠재적인 열 단위와 동일해질 때까지 성장한다. 다년생 작물은 서리가 내린 후 휴면기에 들어가더라도 1년 내내 근권을 유지한다. 이러한 유형의 작물은 평균 일일 기온이 기저 온도를 초과할 때 성장을 시작한다. 본 모델은 복합 작황(최대 10개의 작물이 동일 공간 및 시간에서 성장할 수 있다)에 대해서도 모의를 할 수 있다. 작물 경합 요소는 ALMANAC 모델(Kiniry 등, 1992)에서 처음 개발되었다. 작물은 빛과 물 그리고 양분을 얻기 위해 경합을 벌인다. 해당 작물의 생물 계절학적 발전은 일일 열량 단위 축적에 기반하여 이루어진다.

일일 열량 단위는 다음의 식으로 산출된다.

$$HU = 0.5 * (TMX + TMN) - TBSC; HU > 0.0 \quad (274)$$

여기서 HU 는 하루 동안 축적된 열 단위 수이고, TMX 와 TMN 은 해당 일의 최대 및 최소 온도, $TBSC$ 는 작물별 기저 온도(°C) ($TBSC$ 이하에서는 생장이 전혀 일어나지 않는다)이다. 열단위 지수(HUI)의 범위는 파종시 0에서 생리적 성숙시 1.0인데 일일 HU 값을 축적하고 해당 작물의 잠재적 열 단위로 나눈 값으로 계산된다. 수확일, 엽면적 성장 및 노화, 작물 영양분 최적 농도, 뿌리 내 건물중 분할, 작물 발아 및

경제적 수확량 등은 HUI의 영향을 받는다.

2.8.1 잠재적 성장(Potential Growth)

하루 동안 바이오매스의 잠재적인 증가는 다음의 식으로 산출한다(Monteith, 1977).

$$DDM=0.001*PAR*(RUE-WAVP*X1) \quad (275)$$

$$PAR=0.5*RA*(1.0-\exp(-0.65*LAI)) \quad (275a)$$

$$X1=\max(VPD-1.,-.5) \quad (275b)$$

$$RUE=100.*CO_2/(CO_2+\exp(bc1-bc2*CO_2)) \quad (275c)$$

여기서, DDM은 바이오매스의 잠재적인 증가량($t \ ha^{-1} \ d^{-1}$), RUE는 에너지를 바이오매스로 전환하는 과정과 관련된 복사선 사용 효율($kg \ ha^{-1})/(MJ \ m^{-2})$, PAR는 차단된 광합성 활성 복사선($MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$), RA는 태양 복사에너지($MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$), LAI는 엽면적 지수, VPD는 증기압차(kPa), WAVP는 RUE와 VPD와 관련된 작물 매개변수, CO_2 는 대기의 CO_2 농도(ppm), bc1와 bc2는 RUE- CO_2 곡선상 2개의 입력점에서 결정되는 작물 매개변수이고(Stockle 등, 1992), 상수 0.5는 태양 복사열을 광합성 활성 복사선으로 전환하기 위해 사용되며(Monteith, 1973), 상수 0.65는 소광 계수이다. 실험에 의하면 소광 계수는 잎의 특성, 태양각, 작물의 휴간 거리, 열 방향과 위도에 따라 달라진다(Thornley, 1976). APEX 모델에서 사용되는 값(0.65)은 좁은 휴간 거리를 가진 작물을 대표한다(Uchijima 등, 1968). 다소 적은 값(0.4~0.6)이 평균 태양각이 높은 열대 지역과 넓은 휴간 거리에 적절하다(Begg 등, 1964; Bonhomme 등, 1982; Muchow 등, 1982).

대부분 작물의 경우 엽면적 지수(LAI)는 처음에는 0이거나 매우 작다. 엽면적 지수는 엽의 원시 성장률, 엽의 끝모양, 잎의 확장 등이 열단위 축적 과정과 선형 방정식 관계에 있을 때 초기 작물 성장 시기에 지수적으로 증가한다(Tollenaar 등, 1979; Watts, 1972). 사탕수수과 일부 사료작물의 LAI는 엽면적의 성장과 노화가 대체적으로 동일한 시기인 평탄한 시점에 이른다. 많은 작물의 LAI는 최대점에 이룬 후 감소하고 생리적 성수기에서는 0에 도달한다. 또한 잎의 확장, 최종 LAI, 잎 성장기간은 스트레스로 인해 감소한다(Acevedo 등, 1971; Eik와 Hanway, 1965).

LAI는 열 단위, 작물 스트레스, 작물 성장 단계의 함수로 모의된다. 발생에서 잎이 노화되기 시작할 때까지 LAI는 다음의 식으로 산출 가능하다.

$$LAI(i)=LAI_0(i)+dHUF(i)*XLAI(i)*\sqrt{REG(i)}*LAI_0(i)/TLAI \quad (276)$$

$$HUF(i)=HUI(i)/(HUI(i)+\exp(\text{ah}(1,i)-\text{ah}(2,i)*HUI(i))) \quad (276a)$$

여기서 해당 일의 시작과 마지막 순간에 LAI₀와 LAI는 엽면적 지수값이고, XLAI는 최대 엽면적 지수, TLAI는 하루 시작할 때 성장하고 있는 모든 작물의 총 엽면, HUF는 열 단위 인자, dHUF는 HUF의 일일 변화량, ah 계수는 작물 i에 대한 HUF 및 HUI와 관련된 작물 매개변수, HUI는 열 단위 지수, REG는 아래에서 자세하게 논의될 최소 작물 스트레스 요인 값이다.

잎의 노화가 시작하여 성장시기가 끝날 때까지 LAI는 다음의 식으로 산출 가능하다.

$$LAI(i)=LAI_0(i)*((1.0-HUI(i))/(1.0-HUID))^{ad} \quad (277)$$

여기서 ad는 LAI 감소율을 제어하는 작물 매개변수이고, HUID는 LAI가 감소하기 시작할 때의 HUI 값이다.

작물 높이는 다음의 관계를 통하여 예측할 수 있다.

$$CHT(i)=HMX(i)*\text{sqrt}(HUF(i)) \quad (278)$$

여기서 CHT는 작물 높이(m)이고 HMX는 작물 i에 대한 최대 높이이다.

뿌리계로 분할된 총 바이오매스의 분획은 보통 과종시에는 0.3~0.5로 성숙기에는 0.05~0.20로 감소한다(Jones, 1985). 본 모델은 이 분획을 발생기에서 성숙기까지 감소시켜 이러한 분할과정에 대한 모의를 할 수 있다. 뿌리 부분을 통과할 때 뿌리 무게의 변화는 각 토양층에서 작물 수분 이용 및 뿌리 무게의 함수에 의해 모의된다. 잠재적인 뿌리 무게의 일일 변화량은 다음의 식으로 산출된다.

$$RWT(1,i)=RWT(1,i)+DRW*UTO \quad (279)$$

$$DRW=RW(i)-RW_0(i) \quad (279a)$$

$$RW(i)=DM(i)*(ar1(i)*(1.-HUI(i))+ar2(i)*HUI(i)) \quad (279b)$$

$$UTO=UW(1)/AEP(i); \quad DRW>0.0 \quad (279c)$$

$$UTO=RWT(1,i)/RW_0(i); \quad DRW<0.0 \quad (279d)$$

여기서 RW₀와 RW는 해당 일의 처음과 시작시 총 뿌리무게(t ha⁻¹), RWT는 토양층에 있는 뿌리무게(t ha⁻¹), DM은 총 바이오매스, UW는 토양층의 일일 수분 사용률(mm d⁻¹), AEP는 총 수분 사용률(mm d⁻¹), ar1와 ar2는 작물 매개변수, 첨자 i와 1은 작물과 토양층을 의미한다.

뿌리 깊이는 보통 과종 깊이에서 작물별 최대값까지 빠르게 증가한다. 대부분의 작물에서 최대값은 생리적 성숙기에 도달하기 전에 충분히 잘 얻을 수 있다(Borg와

Grimes, 1986). 뿌리 깊이는 열 단위와 잠재적 뿌리 깊이의 함수로 모의된다.

$$RD(i)=\min(2.5*RDMX(i)*HUI(i),RDMX,RZ) \quad (280)$$

여기서 RD는 뿌리 깊이(m), RDMX는 작물 i에 대한 최대 뿌리 깊이(m), RZ는 토양 단면 깊이(m)이다.

대부분의 곡류, 두류 및 피경류의 경제적 수확량 부분은 생식 기관이다. 작물은 다양한 매커니즘을 가지고 있어 수확물이 작물 성장과 관련된 구성요소가 지탱할 수 없을 정도로 크거나 종의 생존을 담보할 수 없을 정도로 너무 작지 않도록 한다. 따라서 수확 지수(경제적 수확량/지상 바이오매스)는 보통 상대적으로 안정된 값이다. APEX 모델에서 작물 수확량은 수확 지수 개념을 사용하여 예측할 수 있다.

$$YLD(i)=HI(i)*STL(i) \quad (281)$$

여기서 YLD는 해당 필지에서 수확된 작물의 양($t \text{ ha}^{-1}$), HI는 수확지수, STL은 작물 i에 대한 지상 바이오매스($t \text{ ha}^{-1}$)이다. 비 스트레스 조건에서 수확 지수는 다음의 식에 의해 파종기 0에서 생장기 HI까지 비선형적으로 증가한다.

$$HI(i)=F*(HIT(i)-HIMN(i))+HIMN(i) \quad (282)$$

$$F=SWH(i)/(SWH(i)+\exp(5.563-0.03155*SWH(i))) \quad (282a)$$

$$SWH(i)=\text{sum}(AEP(i)); \quad 0.5<HUI(i)<1.0 \quad (282b)$$

$$HIT(i)=HIP(i)*X2/(X2+\exp(11.11-0.1*X2)) \quad (282c)$$

$$X2=100.*HUI(i) \quad (282d)$$

여기서 HIT는 열 단위 축적량과 함수관계에 있는 수확지수를 의미하며, HIMN는 수확 지수의 최소값, HIP는 잠재적인 수확지수 값, SWH는 0.5~1.0의 HUI 범위 내에 있는 작물의 누적수분 사용량(mm)이다. 따라서 잠재적인 수확지수는 정상적인 범위보다 짧은 생장시기 또는 수분 부족으로 인해 감소될 수 있다. 식 282c에서 상수는 HIT가 HUI=0.5일 때 0.1로 HUI=0.95일 때 0.95로 증가하도록 설정된다. 이는 생장 후반에 최대의 경제적 수확량을 얻을 수 있는 곡물의 경제적 수확량 단계와 일치한다.

2.8.2 용수 사용(Water Use)

작물의 잠재 수분 이용량인 EP는 ‘증발산(evapotranspiration)’ 부분에서 논의된 식으로 산출할 수 있다. 토양 표면에서 특정 뿌리 깊이까지의 잠재 수분 이용률은 다음의 함수로 예측할 수 있다.

$$UW(1)=(UX(1)-CU*AEP(i)-(1.-CU)*UX(1-1))*F*RGF \quad (283)$$

$$UX(1)=EP(i)*(1.-\exp(-5.0*RZ*Z(1)/RD(i)))/(1.-\exp(-5.0*RZ)) \quad (283a)$$

$$F=\min(1.0,4.0*(ST(1)-WP(1))/(FC(1)-WP(1))) \quad (283b)$$

여기서 UW는 토양층 1의 수분 이용률(mm d⁻¹), UX는 깊이 Z(토양층 1의 바닥/m)의 잠재 수분 이용률(mm d⁻¹), AEP는 토양층 1 위에 위치한 모든 층의 UW의 합, RZ는 뿌리 깊이(m), RD는 작물 i에 대한 뿌리 깊이(m), RGF는 ‘뿌리 성장 저해요인’ 부분에서 논의될 뿌리 성장 인자, CU는 깊이 Z 이상에서 RGF 값의 곱이다. 식 283은 작물이 좋은 뿌리 환경을 갖춘 토양층에서 물을 끌어다 사용해 건조한 층의 물부족 상태를 보상하도록 한다(UC는 거의 10). 그러나 보상량이 점차 감소하고 마침내 UC는 0.0에 미치게 된다.

2.8.3 양분 흡수(Nutrient Uptake)

질소(Nitrogen)

토양의 질소 공급은 뿌리로의 NO₃-N 질량류에 의해 제한된다.

$$UN(1)=WNO_3(1)*UW(1)/ST(1) \quad (284)$$

여기서 UN은 토양이 공급한 질소 비율(kg ha⁻¹ d⁻¹), WNO₃은 토양층 1에 존재하는 NO₃-N의 양(kg ha⁻¹), ST는 토양수분 함량(mm), UW는 수분 사용률(mm d⁻¹)이다. 식 284에서 얻어진 질량류 비율은 다음의 식에 의해 N 공급과 수요에 의해 제한을 받는다.

$$UN'(1)=UN(1)*DMN/SPN; DMN<SPN \quad (285)$$

$$UN'(1)=UN(1)+DMN-SPN; DMN>SPN \quad (286)$$

여기서 UN'은 토양층 1에서 실제 작물의 질소 흡수량(kg ha⁻¹), DMN은 해당 일에 작물의 N 수요, SPN은 해당 일에 총 토양단면 질소 공급이다. 수요가 공급보다 작을 경우 식 284에서 질량 흐름을 통해 산출된 질소 흡수량은 DMN/SPN 비를 사용하는 식 285에서 감소를 보인다. 수요가 공급보다 클 경우 모든 이용 가능한 질소를 사용하기 위해 식 286이 이용된다. 산출과정은 SPN이 뿌리에서 제거되고 WNO₃이 모든 층에서 0.0이 될 때까지 토양 표면에서 시작하여 각 층마다 이루어진다.

작물의 일일 질소 수요는 작물의 질소함량과 최적의 질소함량 간의 차를 의미한다. 수요는 다음의 식을 통해 산출된다.

$$DMN=UNO-UN1 \quad (287)$$

$$UNO=DM(i)*(bn1+bn2*\exp(-bn3*HUI(i))) \quad (287a)$$

여기서 DMN은 작물 i의 질소 수요율(kg ha⁻¹ d⁻¹), UN1은 해당 작물의 실제 질소 함량(kg ha⁻¹), UNO는 해당 작물에 대한 최적의 질소 함량(kg ha⁻¹), DM은 누적 바이오매스(t ha⁻¹), bn1, bn2 및 bn3은 최적의 N 농도를 작물 성장(HUI)과의 함수를 통해 표현된 작물 매개변수이다. 최적의 작물 질소 농도는 성장 단계가 증가할수록

감소한다(Jones, 1983a).

질소 고정(N Fixation)

일일 질소 고정량은 콩과 작물의 일일 질소 섭취량에 대한 분획으로서 산출된다.

$$WFX' = p7 * WFX + (1 - p7) * UNM \quad (288)$$

$$WFX = FIXR * UNM; \quad ASW3 > 0.25; \text{ and } FXN > 0.0 \quad (288a)$$

$$WFX = 0.0; \quad ASW3 < 0.25; \text{ or } FXN < 0.0 \quad (288b)$$

$$FIXR = \min(FXW, FXN, 1.) * FXP \quad (288c)$$

$$FXP = \min(FXG, FXS, 1.) \quad (288d)$$

$$FXS = 4.0 - 5.0 * HUI(i) \quad (288e)$$

$$FXG = (HUI(i) - 0.1) * 5.0 \quad (288f)$$

$$FXW = 1.333 * ASW3 - 0.333 \quad (288g)$$

$$FXN = 1.5 - 0.005 * TNO3 / RD(i) \quad (288h)$$

$$ASW3 = \text{sum}(ST(1) - WP(1)) / (FC(1) - WP(1)); Z < 0.3 \text{ m} \quad (288i)$$

여기서 WFX'는 최종적으로 조정된 질소 고정 비율(kg ha⁻¹ d⁻¹), WFX는 생장 단계의 토양수분 함량(FXW) 및 토양의 질소 함량(FXN)을 고려하여 계산된 비율(FXP), UNM은 작물의 질소 흡수량(kg ha⁻¹ d⁻¹), p7는 0.0 ~ 1.0 범위에 있는 가중 인자, TNO3는 RD 깊이(뿌리 깊이)까지 토양 내 존재하는 NO₃-N 함량(m)이다. 생장 단계 인자는 기능성 뿌리혹이 발달하기 전 어린 작물 또는 뿌리혹이 노화된 늙은 작물에서 질소 고정을 방해한다(Patterson와 LaRue, 1983).

토양수분 함량 계수는 상층부 0.3 m의 수분 함량이 포장용수량의 75% 이하일 때 질소 고정을 감소시킨다(Albrecht 등, 1984; Bouniols 등, 1991). 근권의 NO₃ 양은 질소 고정에 영향을 미칠 수 있다(Harper, 1976). 이러한 접근 방법은 근권의 NO₃-N 함량이 100 kg ha⁻¹ m⁻¹ 보다 클 때 질소 고정을 감소시키고 질소 함량이 300 kg ha⁻¹ m⁻¹ 보다 더 클 때 질소 고정을 막는다.

인(Phosphorus)

작물의 인 이용은 질소 모델에서 설명한 공급과 수요 접근법으로 산출된다.

$$UP(1) = 1.5 * DMP * LPF * RWT(1, i) / RW(i) \quad (289)$$

$$LPF = CSP(1) / (CSP(1) + \exp(8.01 - 0.3604 * CSP(1))); \quad 0.0 < CSP < 30.0 \quad (289a)$$

$$\text{LPF}=1.0; \text{CSP}>30.0 \quad (289b)$$

여기서 UP는 토양이 공급하는 인 비율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), DMP는 해당 일에 작물의 인 수요, CSP는 토양층 내의 불안정한 인 농도(g t^{-1}), RW는 토양층1 내의 뿌리무게(kg ha^{-1}), RWT는 총 뿌리무게(kg ha^{-1})이다. 상수 1.5는 뿌리의 2/3이 해당 작물의 인 수요를 만족하도록 한다. 이러한 접근 방법은 인 결핍 작물(또는 전지된 뿌리를 가진 작물)의 뿌리가 정상 작물의 뿌리보다 더 빨리 인을 흡수할 수 있다는 연구결과와 일치한다(Andrews와 Newman, 1970; DeJager, 1979; Jungk와 Barber, 1974).

식 289에서 얻은 잠재 흡수율은 다음과 같이 인 수요와 공급의 제한을 받는다.

$$\text{UP}'(1)=\text{UP}(1); \text{DMP}<\text{SPP} \quad (290)$$

$$\text{UP}'(1)=\text{UP}(1)+\text{DMP}-\text{SPP}; \text{DMP}>\text{SPP} \quad (291)$$

여기서 UP'는 실제 작물의 토양층1에서의 인 흡수율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), SPP는 총 토양 단면의 P 공급을 의미한다. 수요가 공급보다 더 클 경우 식 291은 모든 이용 가능한 인을 사용할 수 있도록 하기 위해 사용된다. 산출 작업은 토양 표면에서 시작해 SPP가 근권에서 제거되어 불안정한 인이 모든 층에서 0.0가 될 때까지 각 층마다 이루어진다.

작물의 일일 인 수요는 작물의 인 함량과 이상적인 인 함량사이의 차이를 의미한다. 수요는 다음의 식으로 산출된다.

$$\text{DMP}=\text{DM}(i)*(\text{bp}1+\text{bp}2*\exp(-\text{bp}3*\text{HUI}(i)))-\text{UP}1 \quad (292)$$

여기서 DMP는 작물 i의 인 수요율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), DM은 누적 바이오매스(t ha^{-1}), UP1는 해당 작물의 실제 인 함량, bp1, bp2 및 bp3는 작물 성장 함수(HUI)로 최상의 P 농도를 표현하는 작물 매개변수이다. 불안정 P 농도 인자(LPF)는 CSP가 20 g t^{-1} 이상일 때 최상의 흡수율을 나타낸다. 이는 작물과 토양의 범위에 대한 임계 불안정 인 농도와 일치한다(Sharpley 등, 1990). Sharpley 등(1984, 1985)은 토양 검정 P로부터의 CSP와 기타 다른 토양 특성을 산출하는 방법에 대해 설명한다.

성장 제한(Growth Constraints)

잠재적인 작물 성장과 수확량은 작물 환경이 가하는 제약 때문에 보통 제한을 받는다. 본 모델은 수분, 양분, 온도, 통기 및 복사 등이 야기하는 스트레스를 예측한다. 이러한 스트레스의 범위는 0.0~1.0이며 다양한 방법으로 작물에 영향을 미친다. APEX 모델에서 스트레스를 고려하여 바이오매스 축적, 뿌리 성장 및 수확량에 대한 제한 요소를 예측한다. 바이오매스 제한은 수분, 양분, 온도 및 탄산가스 부족의 최소치이다. 뿌리 성장 제한은 토양 강도, 온도 및 알루미늄 독성의 최소치이다. 표층토의 알루미늄 독성이 어린 줄기 성장에 직접적인 영향을 주기도 하지만 APEX

모델은 뿌리 생장과 수분 사용 억제를 통한 간접적인 영향력을 모의한다. 각 제한을 결정하는데 관여하는 스트레스 인자에 대한 설명은 다음과 같다.

바이오매스(Biomass)

다음의 식을 통하여 앞서 말한 5가지 작물 스트레스 인자 중 어느 하나라도 1.0 이하가 될 경우 식 275를 통하여 산출된 잠재적인 바이오매스는 일단위로 조정된다.

$$DDM' = DDM * REG \quad (293)$$

여기서 REG는 작물 생장을 조절하는 인자(최소한의 스트레스 인자)이다.

수분 스트레스(Water Stress)

수분 스트레스 인자는 다음의 식에서 수요와 공급을 고려하여 산출된다.

$$WS(i) = AEP(i) / EP(i) \quad (294)$$

여기서 WS는 작물 i에 대한 수분 스트레스 인자, AEP는 작물의 수분 이용률(mm d^{-1}), EP는 작물의 잠재적인 수분 이용률(mm d^{-1})이다. 이는 가뭄이 증산 감소에 비례하여 바이오매스 생산에 스트레스를 준다는 개념과 일치하는 내용이다.

온도 스트레스(Temperature Stress)

작물의 온도 스트레스는 다음의 식으로 산출된다.

$$TS(i) = \sin(1.5707 * RT0); 0.0 < RT0 < 2.0 \quad (295)$$

$$TS(i) = 0.0; RT0 < 0.0 \text{ or } RT0 > 2.0 \quad (295a)$$

$$RT0 = (TX - TBSC(i)) / (TOPC(i) - TBSC(i)) \quad (295b)$$

여기서 TS는 작물의 온도 스트레스 인자, TX는 평균 일일 기온($^{\circ}\text{C}$), TBSC는 작물 i에 대한 기저 온도, TOPC는 작물 i에 대한 최적 온도이다. 식 295는 최적 온도에 대한 대칭 작물 성장 스트레스이고 이는 평균 일일 온도에 의해 구동된다.

양분 스트레스(Nutrient Stress)

질소와 인 스트레스 인자는 모의된 작물의 질소와 인 함량과 최적값의 비에 기반한다. 스트레스 인자는 최적의 질소와 인 함유량이 1.0에서 질소와 인이 최적 수준의 절반일 때 0.0까지 비선형적으로 변한다(Jones, 1983a). 질소의 경우 그 크기 조정 식은 다음과 같다.

$$SN(i) = SNS(i) / (SNS(i) + \exp(4.065 - 0.0535 * SNS(i))) \quad (296)$$

$$SNS(i) = 200. * (UN1 / UNO) \quad (296a)$$

여기서 SN은 작물 i에 대한 일일 질소 스트레스 인자, SNS는 질소 스트레스에 대한 크기 조정 인자, UN1는 해당 작물에 대한 실제 질소 함량(kg ha^{-1}), UNO는 해당

작물에 대한 최적 질소 함량(kg ha⁻¹)(식 287에서 산출된다)이다.
인 스트레스 인자인 SP는 인으로 대체된 식 296을 사용하여 산출된다.

통기 스트레스(Aeration Stress)

토양수분 함량이 포화상태에 근접할 때 작물은 통기 스트레스를 겪게 될 수 있다. 스트레스 정도를 산출하는데 있어 토양 상부 1m의 수분 함량이 고려된다.

$$AS(i)=1.0-SAT/(SAT+\exp(2.901-0.0387*SAT)); SAT>0.0 \quad (297)$$

$$AS(i)=1.0; SAT<0.0 \quad (297a)$$

$$SAT=100.*(ST1/PO1-CAF(i))/(1.0-CAF(i)) \quad (297b)$$

여기서 AS는 작물 i에 대한 통기 스트레스 요인, SAT는 포화 인자, ST₁은 토양의 상부 1 m에서 포장용수량을 제외한 수분 함량(mm), PO₁은 토양의 상부 1 m에서 포장용수량을 제외한 공극량(mm), CAF는 작물 i에 대한 임계 통기 인자(대부분의 작물의 경우 0.85)이다. 마지막으로 REG값은 스트레스 인자 WS, TS, SN, SP 및 AS 중에서 가장 낮은 값으로 결정된다.

뿌리 성장(Root Growth)

식 279에서 설명한대로 뿌리 생장은 수분 이용량에 비례한다. 식 283에 따르면 토양층의 수분 이용량은 토양 깊이, 수분 함량 및 보상 계수의 함수로 산출된다. 토양 강도, 온도, 알루미늄 독성과 같은 스트레스 인자는 토양 특성에 따라 산출된다. 이 3가지 스트레스 인자 중에서 가장 낮은 값이 수분 이용 보상 인자를 제어하여 뿌리 성장을 제한한다.

낮은 토양 온도는 특히 심토층에 봄이 천천히 올 때 뿌리의 성장을 제한할 수 있다(Taylor, 1983). 각 토양층에 대한 온도 스트레스는 다음의 식으로 산출된다.

$$STS(1,i)=\sqrt{2.0*STMP(1)/(TOPC(i)+TBSC(i))}; STMP>0.0 \quad (298)$$

$$STS(1,i)=0.0; STMP<0.0 \quad (298a)$$

여기서 STS는 토양층 1에서 작물 i에 대한 온도 스트레스, STMP는 토양 온도 (°C), TOPC와 TBSC는 작물 i에 대한 최적 및 기저 온도이다.

많은 연구를 통하여 토양 강도가 뿌리 성장에 영향을 준다는 사실이 알려졌다. 토양 강도에 대한 3가지 주요한 결정 요인은 용적비중, 조직 및 수분 함량이다(Eavis, 1972; Monteith와 Banath, 1965; Taylor 등, 1966). 다음의 식을 사용하여 APEX 모델의 토양 강도 스트레스 인자를 산출할 때 모두 3가지의 변수가 고려된다.

$$SS(1)=BD(1)/(BD(1)+\exp(br1+br2*BD(1))) \quad (299)$$

$$br2=(\ln(0.01124*BDL)-\ln(8.0*BDU))/(BDL-BDU) \quad (299a)$$

$$br1=\ln(0.01124*BDL)-br2*BDL \quad (299b)$$

$$BDL=p2+0.00445*SAN(1) \quad (299c)$$

$$BDU=p2+0.35+0.005*SAN(1) \quad (299d)$$

여기서 SS는 토양층 1의 토양 강도 인자, BD는 수분 함량에 맞게 조정된 토양 용적비중($t\ m^{-3}$), SAN은 토양층 1의 모래 함량(%), p2는 모래 함량이 0인 토양에 대한 뿌리 스트레스와 관련한 임계 용적비중이고, br1과 br2는 토성에 따른 매개변수이다. br1과 br2 값은 스트레스에 대한 경계 조건을 대체하여 식 299를 동시에 해결하여 얻을 수 있다. 낮은 경계치(BDL)에서 실제로 스트레스는 발생하지 않는다(SS=1.0) (Jones, 1983b). 상위 경계치(BDU)에서 SS=0.2이다.

수분 함량을 보정한 용적비중은 Grossman식으로 산출할 수 있다(Grossman 등, 1985).

$$BD(1)=BD3(1)+(BDD(1)-BD3(1))*RTO \quad (300)$$

$$RTO=(FC(1)-ST(1))/(FC(1)-S15(1)*(4.083-3.33*BDD(1)^{0.333})) \quad (300a)$$

여기서 BD는 토양층 1에 대한 수분 함량을 보정한 용적비중, BD3는 33 kPa 수분 함량에 대한 용적비중, BDD는 오븐 건조 토양의 용적비중(모든 용적비중의 단위는 $t\ m^{-3}$), FC, WP 및 ST는 포장용수량, 위조점 및 현재 조건의 토양층 1에 대한 수분 함량(mm)이다.

알루미늄 독성은 일부 산성 토양층에서 뿌리 성장을 제한할 수 있으며 알루미늄 포화는 이러한 영향력에 대하여 광범위하게 쓰이는 지수이다(Abruna 등, 1982; Brenes과 Pearson, 1973; Pavan 등, 1982). 작물과 품종은 알루미늄 독성에 대한 민감성에서 차이를 보이기 때문에(Foy 등, 1974; Mugwira 등 1980) APEX 모델은 알루미늄 독성을 이러한 민감성 함수로 표현한다. 뿌리 성장과 관련 있는 알루미늄 독성 스트레스 요인은 다음의 식으로 산출된다.

$$ATS(1,i)=(100.-ALS(1))/(100.-ALO(i)) \quad (301)$$

$$ALO(i)=10.+(ALT(i)-1.0)*20.0 \quad (301a)$$

여기서 ATS는 토양층 1에 대한 알루미늄 독성 스트레스 인자(0~1), ALS는 알루미늄 포화율(%), ALO는 작물 i가 스트레스 없이 견딜 수 있는 최대 ALS 값(%), ALT는 작물 i의 알루미늄 내성 지수이다. 다양한 작물에 대한 ALT 값의 범위는 1~5이다(1은 민감, 5는 내성이 있음을 의미한다). 마지막으로 뿌리 성장 제한, RGF는 스트레스 인자로 SS, ATS 및 TS의 가장 낮은 값이다.

작물 수확량(Crop Yield)

작물 수확량은 수분 스트레스로 야기된 수확 지수의 감소로 감소될 수 있다. 대부분의 작물은 개화 직전에서 개화 직후까지 주요 작물 구성 요소가 결정될 때 수분 스트레스에 특히 민감하다(Doorenbos와 Kassam, 1979). 생장에 대한 최적 조건은 흡수원의 크기에 따라 건물중의 축적량이 크고 경제적 수확량이 제한을 받을 때 수확지수의 감소가 아주 적게 일어난다. 다음의 식에 따라 수확 지수는 수분 스트레스의 영향을 받는다.

$$YLD(i)=HIA(i)*HE*PSTF(i)*STL(i) \quad (302)$$

$$HIA(i)=F*(AJHI(i)-WSYF(i))+WSYF(i) \quad (302a)$$

$$F=SWH(i)/(SWH(i)+\exp(5.563-0.0315*SWH(i))) \quad (302b)$$

$$AJHI(i)=HI(i)*X2/(X2+\exp(11.11-0.1*X2)) \quad (302c)$$

$$X2=100.*HUI(i) \quad (302d)$$

여기서 HIA는 작물 i의 수확량을 산출하는데 사용된 수확 지수, AJHI는 모의된 잠재 수확 지수, WSYF는 최소 수확 지수, HI는 최적 수확 지수, HE는 기계 수확 효율, PSTF는 ‘해충’ 부분에서 논의된 모의된 해충 인자, STL은 수확시 수직형 생 바이오매스, HUI는 열 단위 지수이고 SWH는 수확 지수에 가장 큰 영향력을 가지고 있는 생장기 일부 기간 동안(많은 작물에서 생장기 후반) 모의된 수분 이용이다. 식 302c의 매개변수는 HUI=0.5일 때 HIA=0.1, HUI=0.95일 때 HIA=0.95가 되도록 설정된다. 따라서 생장 시기가 서리 또는 다른 이유로 인해 단축될 경우 잠재적 수확 지수 HI는 얻을 수 없다. 식 203의 매개변수는 SWH=10.0 mm일 때 F=0.05, SWH=100.0 mm일 때 F=0.90가 되도록 설정된다.

작물 경합(Plant Competition)

정상적인 작물 생장 모의 방법(다른 작물과 연작 또는 윤작되는 단일 작물)이외에 본 모델은 복합 작황에 대한 모의를 할 수 있다(최대 10개의 작물을 동일 공간 및 시간에서 재배할 수 있다). 작물 경합 요소는 원래 ALMANAC 모델(Kiniry 등, 1992)에서 개발되었다. 작물은 빛, 수분 및 양분을 위해 경쟁한다. 빛을 위한 경쟁은 경쟁 작물의 LAI 함수이다. 수분과 양분 경쟁은 작물 수요, 뿌리 깊이 및 분의 함수로 표현된다.

겨울 휴면(Winter Dormancy)

일장과 관련된 생장 저해요인은 가을에 심은 작물에 대한 겨울 휴면 기간을 산출하기 위해 사용된다. 이 저해 요인은 12개월이 안되는 생장기를 가진 지역에만 적용된다. 본 모델에서 12개월의 생장기는 평균 최저 기온이 5 °C 보다 내려가는 달이

없음을 의미한다. 겨울 휴면기가 존재할 경우 이는 해당 지역의 최소 일장 중에서 일장이 1시간 이내인 시기로 정의된다.

작물이 겨울에 휴면에 들어갈 경우 열 단위 합은 0으로 설정된다. 이는 봄에 온도가 올라갈 때 새로운 생장에 대비하는 것이다. 휴면 기간 중에 작물은 생장을 할 수 없다. 수직형 생체 바이오매스와 엽면적 지수는 서리와 짧은 낮 길이 때문에 이 기간 동안 감소하게 된다.

$$STL'(i)=STL(i)*(1.0-F) \quad (303)$$

$$LAI'(i)=LAI(i)*(1.0-F) \quad (303a)$$

$$F=\max(F_{TM}, F_h) \quad (303b)$$

$$F_{TM}=ATMN/(\text{ATMN}+\exp(\text{bf1}(i)-\text{bf2}(i)*\text{ATMN})); \text{TMN} < -1.0^\circ\text{C} \quad (303c)$$

$$F_{TM}=0.0; \text{TMN} > -1.0^\circ\text{C} \quad (303d)$$

$$F_{HR}=1.-\text{HRLT}/\text{WDRM}; \text{HRLT} < \text{WDRM} \quad (303e)$$

$$F_{HR}=0.0; \text{HRLT} > \text{WDRM} \quad (303f)$$

여기서 STL과 STL'는 하루가 시작하고 끝나는 시점의 수직형 생체 바이오매스를 의미하고, LAI와 LAI'는 엽면적 지수, FTM은 저온 감소 인자, FHR는 일장 감소 인자, TMN은 해당 일에 대한 최소 온도(°C), ATMN는 절대값 TMN, bf1와 bf2는 작물 매개변수, HRLT는 식 16에서 시간 단위로 산출된 일장, WDRM는 해당 지역의 최소 일장에서 1.0을 더한 값(hr)이다.

또한 한해살이 작물의 동사에 대한 조항이 있다. $F_{TM}*(1.-\text{SNOF}) > 0.9$ 일 때 동사가 일어난다. 여기서 SNOF는 식 273b에서 산출된 적설량 인자이다.

2.9 경운(Tillage)

APEX 모델의 경운 요소는 경운 깊이 내에서 양분과 작물 잔사를 혼합하고 용적비중의 변화를 모의하고 수직형 잔사를 수평형 잔사로 변환하기 위해 고안되었다. 경운 요소의 다른 기능은 이랑 높이와 토양표면 조도를 모의하는 것을 포함한다.

각각의 경운 작업은 혼합 효율(0~1)을 할당받는다. 경운 혼합식은 다음과 같다.

$$X(1)=(1.0-EF)*X_0(1)+EF*SMX_0*(Z(1)-Z(1-1))/\text{TLD} \quad (304)$$

여기서 X는 혼합 후 토양층 1내에 해당 물질의 양(kg ha⁻¹)을 의미한다. X₀는 혼합전 물질의 양(kg ha⁻¹), EF는 경운 작업의 혼합 효율(0~1), TLD는 경작 깊이 (m), SMX₀는 혼합 전 TLD내 물질의 합(kg ha⁻¹), Z는 작토 바닥까지의 깊이(m)이다. 식 304에서

경운 깊이 내에서 해당 물질의 분획(1.0-EF)은 혼합되지 않고 남은 물질(EF)은 경운 깊이 내에서 혼합되고 균일하게 분산된다.

각 경운 작업에 대한 작토의 용적비중은 다음의 식으로 모의된다.

$$BDP(1)=BDPo(1)-(BDPo(1)-0.667*BD(1))*EF \quad (305)$$

여기서 BDP는 경운 작업 이후의 용적비중, BDPo는 경운 작업 이전의 토양층 1의 용적비중, BD는 경운 작업 후 완전하게 침하된 토양의 용적비중이다. 다음의 식에 의해 경운 작업 사이에 강우가 발생할 때 토양은 침하된다.

$$BDP(1)=BDPo(1)+F*(BD(1)-BDPo(1)) \quad (306)$$

$$F=SZ(1)/(SZ(1)+\exp(3.92-0.0226*SZ(1))) \quad (306a)$$

$$SZ(1)=0.2*XX*(1.0+2.0*SAN(1)/(SAN(1)+\exp(8.597-0.075*SAN(1))))/Z(1)^{0.6} \quad (306b)$$

여기서 SZ는 토양층 1에 대한 크기 조정 인자, XX는 해당 층으로의 유입량(mm d⁻¹) (표층에 대한 RFV-Q), SAN은 해당 층의 모래 비율이다. 식 306a의 지수 매개변수는 SZ=5.0일 때 10% 침하, SZ=100.0일 때 95.0% 침하를 얻을 수 있도록 설정된다. 따라서 작은 모래를 포함한 표토는 100 mm 삼투를 통해 거의 완전하게 침하된다. 식 306b에서는 강우 규모가 크고 최근에 경작된 모래질의 토양일 경우 빠른 침하가 일어난다. 또한 지표면 근처에서 더욱 빠른 침하가 일어난다(이는 장기간 끌로 깊이 새기는 듯 한 효과를 모의할 수 있게 한다). 물론 침하는 모래 함량이 낮은 토양에서 특히 강우가 낮은 지역에서 상대적으로 느리게 일어난다.

경운 모델의 또 다른 중요한 기능으로 수직형 잔사를 수평형 잔사로 변환하는 것인데 다음의 식으로 산출된다.

$$STD=STD_0*\exp(-56.9*TLD*EF) \quad (307)$$

여기서 STD₀와 STD는 경운 작업 전/후 수직형 잔사의 무게(t ha⁻¹)이고, TLD는 경운 깊이(m)이다.

경운 요소의 다른 기능은 두둑 높이와 간격 그리고 지표면 조도를 모의하는 것이다. 이러한 변수는 각 경운 과정에 따라 구체적으로 명시할 수 있다. 그러나 두둑 간격과 높이는 현재와 이전의 경운 작업 효과를 복합적으로 반영하기 위하여 각 경운 작업이 끝난 후 산출될 수 있다. 두둑 높이는 다음의 식으로 산출된다.

$$RHTT=RHT(k)+(RHT(k-1)-RHT(k))*\exp(-TLD(k)/TLD(k-1)); \quad (308)$$

$$RHT(k)<RHT(k-1) \quad (308a)$$

$$RHTT=RHT(k); RHT(k)>RHT(k-1) \quad (308b)$$

여기서 RHT는 경운 작업(k) 이후 두둑 높이(m), RHT는 경운 작업에 대한 두둑 높이 입력치(m)이다. 각각의 경운 작업이 끝난 후 두둑 간격은 더 큰 RHT 값을 가진 경운 작업의 두둑 간격 입력치로 맞추어진다.

사용자는 각 경운 작업의 일자와 깊이를 지정할 수 있다. 토양이 충분히 건조하다면 경운 작업을 할 수 있다. 그렇지 않은 경우 작업은 이후의 적절한 날에 일어난다.

열 단위 축적량의 분획을 통해 경운 일정을 잡는 것도 가능하다. 열 단위 일정은 사용자가 입력하거나 APEX 모델에서 개발한 대로 자동으로 이루어질 수 있다. 따라서 다양한 조합의 일정관리(일자, 열 단위 입력값 또는 자동 열 단위)가 가능하다.

수확 지수와 수확 효율은 거의 모든 수확 전략을 수용할 수 있도록 충분한 유연성을 제공한다. 수확 지수(HI)는 각 작물에 대해 입력되고 ‘작물 수확량’ 부분에서 설명한 것처럼 모의 발생기간이 각각 1년으로 조정된다. 보통 조정된 수확 지수는 작물에서 제거된 지상 바이오매스의 분획에 영향을 준다. 따라서 옥수수 같은 곡물의 경우 40~50%가 제거된다. 그러나 사일리지로 사용되기 위해 수확된 옥수수의 경우 HI 입력값은 약 0.95이다. HI를 무시할 경우 단일 작물이 2가지 다른 방법으로 수확될 수 있다. 예를 들어 다음의 모델 조정값 HI=0.4을 사용하여 곡물을 얻기 위해 귀리를 수확한 다음 적절한 재정값(0.5~0.95)을 사용하여 짚 꾸러미를 만들 수 있다. 수확 효율(HE)은 수확된 물질 중에 얼마만큼이 실제로 경작지를 떠나게 되는지를 의미한다. 대부분의 과정에서 HE의 범위는 0.7~0.95이다. 그러나 피복 작물 아래의 경운 작업을 모의하기 위해 0.0 정도로 낮게 설정할 수도 있다.

2.10 작물 환경 제어(Plant Environment Control)

작물 환경 제어 요소는 관개용수, 비료, 석회 및 농약을 적용하거나 방목 또는 배수 시스템을 모의하는 기작을 제공한다.

2.10.1 배수(Drainage)

지하 배수 시스템을 통한 배수과정은 자연적인 측방 지표아래 유출의 변형된 형태로 취급된다. 배수 시스템의 깊이와 배수 시스템이 식물 스트레스를 감소시키기 위해 필요한 시간을 표시하여 배수과정을 모의할 수 있다. 배수 시스템을 포함한 층과 관련하여 d에서의 배수 시간은 식 80의 이동 시간을 대체한다.

2.10.2 관개(Irrigation)

APEX 모델 사용자는 건조지역 또는 관개 농업 지역에 대해 모의를 할 수 있다. 스프링클러 또는 고랑 관개에 대한 모의를 할 수 있고 사용자가 직접 또는 자동으로 사용 일정을 관리할 수 있다. 언급한 대로 사용자가 일정을 정할 수 있기 때문에 사용일자와 비율 등을 입력할 수 있다. 자동 방식을 선택할 경우 본 모델에서 사용할 물의 양과 시기를 결정한다.

자동 방식에 필요한 입력 자료는 응용 프로그램을 제동할 신호를 포함한다; 3가지 제동 방법이 있는데 이는 작물의 수분 스트레스 정도(0~1), 작토층의 토양수분 장력(kPa) 또는 근권의 토양수분 부족량(mm)이다. 각 작물에 적용된 최대량(mm), 유거수 분획, 최대 및 최소 단일 사용량(mm) 및 프로그램 적용에 관한 최소 시간 간격(d)을 포함한다.

고정형과 가변형 2가지 방법이 적용 가능하다.

고정형 :

1. 사용자 지정 방식- 입력한 양이 지정한 날에 적용된다.
2. 자동화 방식- 구동될 경우 단일 이용에 필요한 최대 용량이 사용된다.

가변형 :

1. 사용자 지정 방식-근권에서 포장용수량 수준까지 채우기 위해 필요한 양, 최대 단일 사용량과 지정량의 최소치이다.
2. 자동화 방식-사용량은 포장용수량 수준까지 근권을 채우기 위해 필요한 양과 최대 단일 사용량의 최소치이다.

또한 적절한 방식(사용자 지정 고정 방식은 제외)에서 파생된 사용량이 입력된 최소 단일 사용량보다 적을 경우 관개는 일어나지 않는다.

적용 방식(고정식 또는 가변형)이 전체 운작 기간 동안 변경할 수 없다. 하지만 제동값, 기준(작물 수분 스트레스 수준, 토양수분 장력 또는 근권의 수분 부족)과 유거수 분획은 작업 동안 언제라도 변경될 수 있다. 또한 사용자 및 자동 일정 방식을 조합해서 사용할 수도 있다.

2.10.3 비료(Fertilization)

비료 사용은 관개 과정과 유사하다. 사용자가 직접 일정을 관리하거나 자동 방식을 선택할 수 있고 고정형과 가변형 방식이 이용 가능하다. 자동화 방식에 필요한

입력 자료는 제동장치(작물의 질소 스트레스 수준(0~1))이다. 또한 작물에 시용된 연간 최대 질소량(kg ha⁻¹)과 최소 시용 주기(d)를 포함한다.

고정형 :

1. 사용자 지정 방식- 사용자가 설정한 비료 혼합 및 비율이 지정한 깊이만큼 지정한 날짜에 적용된다.
2. 자동화 방식- 사용자가 지정한 비료 혼합 및 비료가 구동시 적용된다.

가변형 :

1. 사용자 지정 방식- 본 모델은 작물의 연간 질소 흡수량을 예측하고 모의된 질소 흡수율에 따라 매년 이 예측치를 업데이트한다. 비료에 대한 일정이 확정되었을 때, 시용률은 연간 평균 질소 흡수율과 근권에 존재하는 질소량간의 차이로 산출된다.
2. 자동화 방식- 구동시 비료가 자동으로 적용된다. 시용률은 연간 평균 질소 흡수율과 근권에 존재하는 질소량간의 차이로 산출된다.

다른 특징 및 제한은 파종시 작물에 시용된 연간 최대 질소 사용량을 변경할 수 있는 기능을 포함한다. 사용자 지정 및 자동 일정 방식을 조합하여 사용할 수도 있다. 제동값에 도달하였더라도 질소가 활성 작물 성장 제한 요인일 경우에만 자동 적용이 가능하다. 따라서 연간 질소와 인 시용률은 작물의 수요, 이러한 요구량을 제공할 수 있는 토양의 능력, 수분 및 온도 스트레스에 대한 질소 스트레스의 규모 등에 따라 달라진다.

2.10.4 중화(Liming)

APEX 모델은 알루미늄의 독성 수준을 중화시키기 위해서 또는 토양의 pH를 최적 수준으로 하기 위해 석회 사용을 모의한다. “높은 수준으로 풍화된” 토양과 기타 다른 토양이 필요로 하는 석회량을 산출하기 위해 각기 다른 알고리즘이 사용된다(Oxisols, Ultisols, Quartzipsamments, Ultic subgroups of Alfisols, Dystric suborders of Inceptisols) (Sharpley 등, 1985). 이러한 토양의 pH를 5.5 수준으로 증가시키고 추출 가능 알루미늄을 더욱 비활성 형태로 전환하기 위해서는 적절한 양의 석회가 필요하다. 그러나 이러한 토양의 pH는 5.5 이상의 높은 수준으로 완화되고 pH를 7.0에 근접한 수준으로 끌어올리기 위해 상당히 많은 양의 석회가 필요하다. 그 결과로 가변 전하 점토를 포함한 토양의 경우 알루미늄 포화상태를 적절한 수준으로 감소시키기 위해 석회를 도포하게 된다.

각 토양층의 석회 포화상태는 다음의 식으로 산출할 수 있다(Jones, 1984).

$$\text{ALS}(1)=154.2-1.017*\text{BSA}(1)-3.173*\text{WOC}(1)-14.23*\text{pH}(1); \text{pH}<5.6 \quad (309)$$

$$\text{ALS}(1)=0.0; \text{pH}>5.6 \quad (310)$$

여기서 ALS는 KCl 침출성 알루미늄을 유효 양이온교환능(ECEC)으로 나눈 값으로 산출된 유효 토양층 1의 알루미늄 포화상태(%)를 의미하며, BSA는 NH₄OAc (pH=7.0)법에 의해 결정된 양이온교환능(CEC)에서 산출된 염기포화도(%), WOC는 유기탄소 함량(%), pH는 토양 pH이다. 높은 수준으로 풍화된 토양의 경우 작토내 독성 알루미늄을 중화하기 위하여 필요한 석회는 다음의 식으로 산출한다.

$$\text{RLA}=0.1*\text{ALS}*ECEC*\text{BD}*TLD \quad (311)$$

여기서 RLA는 알루미늄 중화를 위해 필요한 석회(t ha⁻¹), CEC는 유효 양이온교환능(cmol(p+) kg⁻¹), BD는 토양의 용적비중(t m⁻³), TLD는 경운 깊이(m)이다.

ECEC는 SMB/ALS(Soil Survey Staff, 1982)로 산출되는데, 여기서 SMB(cmol kg⁻¹)는 NH₄OAc (pH=7.0)에서 추출된 염기의 합이다. 상수 0.1은 2 cmol(p+) CaCO₃가 1 cmol(p+)의 추출 가능한 알루미늄을 환전하게 중화시키는데 필요하다는 가정 하에 cmol(p+) kg⁻¹의 추출가능 알루미늄을 이에 상응하는 CaCO₃(t ha⁻¹)로 변환한다(Kamprath, 1970). 매년 말에는 필요한 석회량을 충족하기 위해 충분한 석회가 시용된다. RLA<1 t ha⁻¹일 경우 석회는 시용되지 않는다. 석회가 시용되었을 때 작토층의 pH는 5.4로 증가되고 ALS는 0.0으로 감소된다.

APEX 모델에서 토양 산성화 및 염기 포화도 감소는 질소 비료와 콩과작물에 의한 공생적 질소고정을 추가하여 일어난다. 모든 질소 비료는 상당한 산성화 효과를 가진 무수 암모니아, 요소, 질산 암모늄 또는 이들의 혼합물에서 파생된다고 가정한다. 고정된 질소 또는 비료의 CaCO₃ 등가물은 1.8 kg CaCO₃ kg⁻¹ N라고 가정된다(Pesek 등, 1971). 이는 거름으로 준 옥수수에 대해 Pierre 등(1971)이 콩과작물에 대해 Nyatsanga와 Pierre(1973)와 Jarvis와 Robson(1983)이 보고한 편차 범위 내에 존재한다.

모의 매년 연말에 작토층의 pH는 질소 비료와 질소 고정에 의해 야기되는 염기 포화의 변화를 반영하기 위해 감소된다. 염기 포화의 변화는 다음의 식으로 산출된다.

$$\text{DSB}=0.036*(\text{FN}+\text{WFX})/(\text{BD}*TLD*\text{CEC}) \quad (312)$$

여기서 FN는 해당 년도에 추가된 질소 비료량(kg ha⁻¹)이며, WFX는 콩과작물에 의한 질소 고정량(kg ha⁻¹)을 의미한다. pH값은 다음의 식으로 감소된다.

$$\text{PH}=\text{PHo}-0.05*\text{DSB} \quad (313)$$

여기서 상수 0.05는 BSA 값이 60~90 사이일 때 여러 토양에 대한 pH와 DSB 간의

관계 기율기와 근사치를 이룬다(Peech, 1965). 다른 토양의 경우 필요한 석회량은 토양의 pH를 다음의 식에 따라 6.5까지 끌어올리기 위해 필요한 석회량을 의미한다.

$$RLA=0.01*BD*TLD*CEC*DSB \quad (314)$$

여기서 DSB는 토양 pH를 6.5로 증가시키기 위해 필요한 염기 포화도의 변화를 의미한다. 상수 0.01은 시용된 CaCO₃가 등가의 비포화 CEC와 반응한다는 가정 하에 DSB(%)를 이에 상당하는 CaCO₃(t ha⁻¹)로 변환한다.

$$DSB=\min((.5-PH)/0.023;90.0-BSA) \quad (315)$$

풍화 수준이 높지 않은 토양의 경우 RLA>2.0 t ha⁻¹일 때 석회는 연말에 시용된다. 석회가 시용되어 pH가 6.5로 변하면 염기 포화도는 DSB에 의해서 증가된다.

2.10.5 병해충(Pests)

APEX 모델에서 고려되는 병해충은 3가지 유형으로 곤충, 잡초 및 식물병이다. 곤충과 식물병의 영향력은 APEX 병해충 인자를 통해 표현되는데, 잡초 문제는 작물 성장 부분에서 논의된 작물 경합으로 모의된다. 수확시 작물 수확량은 모의된 수확량과 병해충 인자의 곱으로써 산출된다. 병해충 인자는 0.0~1.0의 범위에 이른다. 1.0은 병해충 피해가 없음을 의미하고 0.0은 병해충으로 인한 총 작물 고사량을 의미한다. 병해충 인자는 온도, 습도 및 지표 피복과 함수 관계에 있으며 일단위로 모의된다.

$$PSTF=1.0-(1.-PST(i))*Z1/(Z1+\exp(2.696-0.499*Z1)); PSTS>0.0 \quad (316)$$

$$Z1=PSTX*PSTS/IPST \quad (316a)$$

$$PSTF=1.0; PSTS<0.0 \quad (316b)$$

$$PSTD=TMN*(0.01*(ADRF-p9)+1.0); TMN>0.0; CV<p10 \quad (316c)$$

$$STD=TMN; TMN<0.0 \quad (316d)$$

여기서 PSTF는 작물 수확량을 조정하기 위해 사용된 병해충 인자, PST는 작물에 대한 최소 병해충 인자값, PSTD는 일일 병해충 지수, PSTS는 일일 누적 병해충 지수, IPST는 생장기 기간(d), PSTX는 병해충피해 크기범위 인자, TMN은 해당 일의 최소 온도(°C), ADRF는 측정일 i이전의 30일 동안의 누적 강우량(mm), p9는 임계 30일 강우량(mm), CV는 지표 식물(생 바이오매스 및 작물 잔사)(t ha⁻¹), p10은 임계 지표 피복값(t ha⁻¹)이다.

따라서 병해충 지표는 충분한 지표 작물이 있는 따뜻하고 습한 기간에 급속도로 증가하고 낮은 온도에서 감소한다. 이러한 일반적인 병해충 지표는 기후변화와

관련된 병해충 문제의 주요한 차이를 설명하고자 하는 시도이다.

농약을 사용하였을 때 병해충 지수는 다음의 식을 사용하여 감소될 수 있다.

$$PSTS=PSTS-1000.0*PSTE \quad (317)$$

여기서 PSTE는 0.0~1.0에 이르는 농약을 통한 제거율이다. 따라서 제거율은 1.0에 근접하고 병해충 지수는 거의 1,000 단위로 감소된다.

2.10.6 고랑 제방(Furrow Diking)

고랑-제방은 작물 생산에 필요한 수분을 보존하기 위해 고랑 맞은편에 작은 임시 제방을 구축하는 과정이다. 이러한 작업은 유거수를 감소시키기 때문에 침식 관리에도 도움이 된다. APEX의 고랑-제방 모델은 두둑 간격에 구애받지 않고 원하는 간격으로 제방을 고랑 아래쪽으로 구축할 수 있게 한다. 제방은 언제라도 기계장치를 통해 구축 또는 해체가 가능하다. 예상치 못한 일로 인해 유거수 예상치가 제방의 저장량을 초과할 경우 물이 넘치고 예상된 유거수는 모두 소실된다. 그렇지 않을 경우 모든 강우는 침투하여 작물에 사용할 수 있게 된다. 유거수가 제방을 파괴할 경우 본 모델은 자동적으로 이를 재구축한다. 제방의 저장량은 다음의 식으로 산출된다.

$$DVOL=FDSF*(A_2*DH+0.5*(A_2+A_3)*(DI-4.*DH)+A_3*D_3)/(RINT*DKIN) \quad (318)$$

$$DVOL=FDSF*A_2*(DH+.5*(DH/STP-2.0*DH))/(RINT*DKIN) \quad (319)$$

$$A_2=.5*D_2*(TW_2+BW)$$

$$A_3=.5*D_3*(TW_3+BW)$$

$$TW=RINT-DH$$

$$BW=\max(TW-4.0*DH, 0.1 *TW)$$

$$DI=DKIN-DH$$

$$D_2=DH*(1.0-2.0*STP)$$

$$D_3=DH-STP*(DI-2.0*DH)$$

$$TW_2=BW+D_2*(TW-BW)/DH$$

$$TW_3=BW+D_3*(TW-BW)/DH$$

여기서 DVOL는 제방의 용량(mm), DH는 제방의 높이(m), D₂와 A₂는 하류 제방 배수로 부분의 수심(m) 및 단면적(m²)이고, D₃와 A₃는 상류 제방의 배수로 부분의 수심(m) 및 단면적(m²)이며, RINT는 이랑 중심부의 거리(m), TW는 깊이 DH의 수면폭, TW₂와 W₃는 깊이 D₂와 D₃의 수면폭, BW는 고랑의 바닥폭(m), DKIN는 제방 중심부의 거리이며, DI는

최대 저류량을 갖춘 제방간의 수면 거리(STP=0.0), STP는 고랑의 경사($m\ m^{-1}$), FDSF는 안전 인자이다.

식 318과 319는 고랑 두둑과 제방이 사다리꼴로 2:1의 측면 경사를 가지고 두둑과 제방의 윗 너비는 동일한 H라는 가정 하에 발전되었다. 2가지의 제방 배치 형태가 가능한데 서로 약간 다른 해결방법이 필요하다. 일반적으로 제방 간격은 상대적으로 짧고 (1.0~3.0 m), 고랑쪽 경사는 상대적으로 평평하다(<1.0%). 제방이 가득 찰 경우 물은 하향 제방의 상부에서 고랑 위쪽으로 확장하여 상향 제방의 배수구 위쪽 지점까지 이른다. 이때의 용량은 두 제방의 배수구 지점의 단면적을 이용하여 산출된다. 식 318에서 생성된 이 접근법은 3부분(하향 제방의 상단과 배수구 사이, 두 제방의 배수구 사이, 상향 제방의 배수구와 수면선 사이)에서 용량을 계산한다. 더 간단하지만 다소 독특한 제방의 배치형태는 상향 수면선은 상향 제방의 배수구 쪽으로 이어지지 않는다. 오직 하나의 단면이 연관되고 이 때의 용량은 식 319에 따라 두 부분으로 산출된다. 따라서 농경지의 평균 제방 용량은 경사도, 제방 높이 및 간격에 따라 식 318 또는 319를 통해 산출된다. 그러나 농경지의 경사도는 일정하지 않고 제방과 두둑 높이는 변화하며 고랑 및 제방의 측면 경사도는 2:1가 아닐 수 있다. 따라서 본 모델은 사용자가 직접 관리하는 제방 안전 인자(FDSF)를 통해 농경지 전체에 다양한 조건을 고려할 수 있다. 제방 안전 인자는 보전적 또는 최적의 제방 시스템 설계가 가능하다.

강우가 제방 위로 범람하지 않을 경우에는 침강을 초래하여 저장량을 감소시킨다. 침강은 다음의 식으로 산출된다.

$$DH=DH_0*\exp(-0.1*YW-Y) \quad (320)$$

여기서 DH_0 와 DH 는 침강 전후의 제방 높이(m), Y 와 YW 는 USLE와 WECS에 의해 산출된 토양 유실량($t\ ha^{-1}$)이다. 두둑 높이는 식 320에 포함된 침강 함수를 이용하여 감소된다. $DH/DH_0 < 0.7$ 일 때 제방은 자동으로 재건축된다.

2.11 경제성(Economics)

APEX 모델의 경제적 구성 요소를 보다 정확하게 표현하자면 작물 예산과 회계 시스템이라 할 수 있다. 이 알고리즘은 작물을 생산하고 판매하는데 소요되는 비용을 기록한다. 비용(및 수입)은 두 그룹으로 구분된다. 수확량에 따라 변하는 경비와 그렇지 않은 경비가 그것이다. 두 그룹을 순서대로 다루어 보도록 한다. 모든 경비 기록부는 수확시 청산된다. 수확 이후의 모든 작업은 작부 체계상 다음 작물로 청구된다.

경운과 (수확 전) 기계 작업 비용은 수확량과 관계없는 것으로 간주된다. 이러한 작업 비용은 APEX 모델에서 별개로 산출되어야 하고 하나의 변수로 경운 파일로 입력된다. 비용 셀에는 단일 작업 또는 활동과 연관된 모든 비용을 포함한다(예: 골 작업은 트랙터와 골 모두에 대해 연료, 인건비, 감가상각비, 수리 및 이자 등을 포함한다). Micro Budget Management System(MBMS) (McGrann 등, 1986)와 같은 예산 생성 프로그램은 이러한 계산 작업에 매우 편리하다. 이는 Enterprise Budget Generator(Kletke, 1979)에서 개발된 최신 버전의 상호작용 프로그램이다. MBMS는 기계 연산을 통해 비용을 항목별로 출력할 수 있다는 점에서 APEX 모델과 호환성이 높다. 이러한 정보는 미터법 단위로 변환 되었을 때 APEX 모델의 기기 파일로 직접 입력될 수 있다. 농장 관련 제반 경비, 지대 및 기타 고정 비용은 우선 기기 넘버 및 비용 정보만을 가지고 장비 파일에서 산출 연산을 생성한 다음, 산출 연산을 통해 APEX 모델에서 비용을 예측하여 해당 작물로 청구된다. 정부 지불금의 경우 마이너스 금액을 동일한 방식으로 입력하여 적립할 수 있다. 산출량과 경영 상태에 따라 달라지는 비용은 APEX 모델에서 2개의 입력 데이터 영역으로 입력된다. 종자 비용, 파종 속도 및 작물 가격은 각 작물 코드별로 작물 매개변수 파일로 입력된다. 종자 비용은 파종 속도 및 kg당 비용의 곱으로 산출된다. 개량 비용도 유사한 방식으로 산출된다. 개량 작업은 질소와 인 원소, 관개수 및 석회 관련 작업을 포함한다. ha당 총 비용은 기기 운영, 종자 및 개량 작업에 소요되는 비용의 합이다. ha별 시장 가격은 작물 수확량과 순 작물 가격의 곱에 의한다. 순 작물 가격은 시장가격에서 수확, 운반 및 기타 수확과 관련한 처리 비용을 제한 값이다. 순 작물 가격은 APEX 모델과는 별개로 결정되어야 한다.

유용한 비용 수치가 APEX 모델의 입력 셀로 입력되면 본 모델은 작물별 연간 비용과 수익을 결과물로 산출한다. 수익과 비용에 대한 연간 분포값을 분석하기 때문에 APEX 모델의 예산 정보는 수익 분석 뿐만 아니라 위기 관리를 위해서도 중요한 자료이다. 위기 분석 능력은 경제적 연구를 위한 APEX 모델의 분석값을 크게 향상시킨다.

경제 분석에 있어서 APEX 모델의 최대 장점은 내부 회계 관리 기능이 아니라 일 단위, 월 단위, 연 단위 또는 다년간 기간에 수집되는 물리적 자료로 이는 경제 모형, 예산 생성기 및 위기 분석 시스템에 입력값으로 활용될 수 있다. 경영, 토양의 양과 질, 기후(예: 지구 온난화), 가뭄 등에 대응하기 위해 필요한 입력값의 변화가 예측된다. 이러한 출력값은 다른 정책 또는 프로그램 대안을 종합적으로 분석하는데 도움이 될 경제 및 자연 자원 모델 등에 입력값으로 활용될 수 있다.

제3장 APEX 추적 구성 요소

제 3 장 APEX 추적 구성 요소

3.1 수분(Water)

APEX 모델은 수로 및 범람원을 통해 수분을 추적할 수 있는 두 가지 방법을 제공하는데, 일일 평균 유동 기법과 단주기 완전 홍수 추적법이 그것이다. 홍수가 큰 문제가 되지 않는 용도에는 일 단위 기법으로 충분할 수도 있다. 그러나 완전 홍수 추적 방식은 실제 하천 유량에 대한 예측치를 제공하고 오염 물질의 이동을 예측하는데 있어 잠재적으로 정확성을 증가시킬 수 있다.

3.1.1 일 단위 기법(Daily Time Step Method)

주요 목적이 농장 전체 및 소규모 구역에서 유출되는 장기적인 수분, 퇴적물, 양분 및 농약의 양을 모의하는 것이라면 일 단위 방식은 현실적인 산출치를 생산해 내고 산출 과정이 매우 효율적인 방법이다. 유거수 발생 시 평균 유출률은 다음의 식으로 산출된다.

$$q=Q*WSA/(360.*(DUR+TC)) \quad (321)$$

여기서 q 는 하도구간 유입에 대한 평균 유출률($m^3 s^{-1}$)을 의미하며, Q 는 유입량(mm), WSA 는 하도구간 위 구역의 면적(ha), DUR 는 강우 지속기간(h), TC 는 하도구간 위 구역의 도달시간(h)이다. 수로 용량은 사다리꼴 형상을 가정 아래 Manning 식을 이용하여 산출할 수 있다. 수로의 측면 경사는 다음의 식으로 산출된다.

$$CSS=0.5*(CTW-CBW)/ZCH \quad (322)$$

여기서 CSS 는 수로의 측면 경사($m m^{-1}$), CTW 는 수로의 윗 너비(m), CBW 는 수로의 아래 너비(m), ZCH 는 수로 깊이(m)이다. 수로의 용량은 다음의 식으로 산출된다.

$$q_{cp}=CHXA^{1.667}*sqrt(CHS/CHN)/CHP^{0.667} \quad (323)$$

$$CHXA=0.5*Z_{CH}*(CBW+CTW) \quad (323a)$$

$$CHP=CBW+2.0*Z_{CH}*sqrt(CSS*CSS+1.0) \quad (323b)$$

여기서 q_{cp} 는 수로의 용량($m^3 s^{-1}$), $CHXA$ 는 독 상부의 단면적(m^2), CHS 는 경사도 ($m m^{-1}$), CHN 은 Manning n 값, CHP 는 접수 길이(m)이다. $q < q_{cp}$ 일 경우 유동은 수로 내에 포함되고 유동 속도는 비선형 방정식을 풀기 위한 Newton 기법을 이용하여 산출된다. 이 해법은 정확한 유동률을 얻기 위하여 유동 깊이를 조정하는 것을 포함한다(q). 수로의 유동 속도는 유동률을 단면적으로 나눔으로써 얻을 수 있다.

$$VCH=q/(Z_{CH}' *(CBW+Z_{CH}' *CSS)) \quad (324)$$

여기서 VCH 는 각 사상별 유동 깊이(Z_{CH}' , m)에 대한 유속($m s^{-1}$)이다. $q < q_{cp}$ 일 경우

범람원에 유동이 발생하고 유동률은 다음의 식으로 산출된다.

$$q_{fp} = q - q_{cp} \quad (325)$$

여기서 q_{fp} 는 범람원의 유동률($m^3 s^{-1}$)이다. 유동 깊이는 다음의 Manning 식으로 산출된다.

$$Z_{FP} = (q_{fp} * FPN / (FPW * \sqrt{FPS}))^{0.6} \quad (326)$$

여기서 Z_{FP} 가 범람원의 유동 깊이(m)이고, FPN은 Manning n 값, FPS는 경사도 ($m m^{-1}$), FPW는 범람원의 폭(m)이다. 유동 속도는 다음의 식처럼 비율을 면적으로 나눈 값이다.

$$VFP = q_{fp} / (Z_{FP} * FPW) \quad (327)$$

여기서 VFP와 Z_{FP} 는 범람원의 유동 속도($m s^{-1}$)와 깊이(m)이다. 하도구간 범람원까지의 이동 속도는 길이를 속도로 나눈 값이다.

$$TRT = FPL / (3.6 * VFP) \quad (328)$$

여기서 TRT는 하도구간 범람원의 이동 시간(h)이며 FPL는 범람원 길이(km)이다. 다음의 식에 의하면 유입량은 범람원의 침투 작용에 의해 감소한다.

$$q_{fp}' = q_{fp} - SC * TRT \quad (329)$$

여기서, q_{fp}' 와 q_{fp} 는 범람원의 유입량과 유출량(mm)이며 SC는 범람원의 포화 전도도($mm h^{-1}$)이다.

3.1.2 가변 저류계수 홍수 추적 기법(Variable Storage Coefficient Flood Routing Method)

가변 저류계수(VSC) 홍수 추적 기법(Williams, 1975a)은 짧은 시간 단위로(일반적으로 0.1~1.0 시간) 수문곡선의 모의가 가능하다. 하위 영역에서 나온 유출수의 수문곡선은 하루 쪽으로 모의되고 추적되어 유역 출구 쪽에 이른다. 이 완전한 홍수 추적 접근법은 하천의 동적 흐름에 대한 모의를 제공하는 반면 시간별 기법은 일일 유출량만을 예측한다(일 단위로 모의된 유출수는 모든 하위영역에서 출발해 하루가 끝나는 시점에 유역의 출구에 도착한다). 이는 0.5일 이상의 유동 농도를 가진 유역에 있어 매우 중요한 특징이다. 홍수 단계, 지속 기간 및 오염 물질 수송능력을 예측하는데 매우 중요하다.

하위 영역 수문곡선(Subarea Hydrographs)

강우 사상에 대한 강우 시간 분포도는 식 42와 43을 통해 일일 강우량에서 얻을 수 있다. 초과 강우량은 사용자가 지정한 시간 간격으로 식 29를 누적 강우 분포도에 적용하여 산출할 수 있다. 유출 수문 곡선은 저류량 고갈 기법이라 불리는 변형된 VSC 기법을 통하여 모의할 수 있다. 유역의 저장 용량은 정해진 시간 간격에 따라 각 구간 동안 초과 강우량을 현재의 저장 용량에 이용하여 산출한다.

$$STH=STH_0+DQ \quad (330)$$

여기서 STH_0 와 STH 는 첫 구간과 마지막 구간(h)에서 유역의 저장 용량(mm)을 의미하며, DQ 는 해당 구간에 대한 초과 강우량(mm)를 의미한다.

저수지 체류시간 접근법을 이용하여 해당 구간 동안 저류량은 고갈되게 된다.

$$STH=STH_0*\exp(-p73*DTHY/TC) \quad (331)$$

여기서 $p73$ 은 매개변수($0.1 < p73 < 1.0$)이다. $DTHY$ 는 시간 간격(h), TC 는 유역의 도달 시간(h)이다. 유역의 유출률은 식 330과 331을 결합하고 초기 저류량에서 마지막 저장량을 빼고 용량에서 비율로 변환하여 얻을 수 있다.

$$q_{hy}=(STH_0*(1.0-\exp(p73*DTHY/TC))+DQ)*WSA/(DTHY*360.) \quad (332)$$

여기서 q_{hy} 는 유역의 유출률($m^3 s^{-1}$)을 의미하고 WSA 는 유역 면적(ha)이다. 저류량 고갈 기법은 단위 수문 곡선 방법에 비해 신뢰성 있는 결과를 제공하고 훨씬 효율적인 계산 과정을 제공한다. 계산 효율은 완전한 홍수 추적을 이용한 연속 모의에 있어 매우 중요하다. 전통적으로 홍수 추적은 사상 모델과 관련이 있다.

홍수 추적(Flood Routing)

VSC 홍수 추적 모델은 본 모델에 앞서 개발되어 서술되었다(Williams, 1975a). HYMO 모델의 가장 중요한 구성 요소로(다른 구성 요소는 VSC와 상호작용하거나 기여하는 역할을 한다) 사상 모드에서 수년간 모의를 하기 위해 전 세계적으로 사용되었다. 동일한 기본 방정식이 연속 모의에 사용되지만 유역의 모든 수문곡선에 대한 마지막 일일 저류량과 유동률을 유지하는 것과 같은 추가적인 적용상의 문제점이 존재한다. 여기서는 필수적인 방정식만이 제시된다. 추적 관련 문제점은 4개의 유동률(q_{i1} , q_{i2} , q_{o1} , q_{o2})을 동반한다. 유입 수문곡선은 알려진 q_{i1} 과 q_{i2} 값을 제공한다. q_{o1} 는 초기 단계에서 알려진 값이다(이전 시간 단계의 유출률). 따라서 q_{o2} 는 다음과 같이 각 시간 단계에서 결정되어야 한다.

1. 비선형 방정식의 해를 구하기 위한 Newton 법이 유입률(q_{i2})과 수로 및 범람원의 기하학적 구조를 고려하여 정상적인 유동 깊이(D_{i2})를 구하기 위한 Manning 식을 풀기 위하여 이용된다.

2. 연속적 근사 해법이 q_{o2} 을 산출하기 위해 이용된다. 본 모델은 $g_s=q_{o1}$ 에 대한 첫번째 산출치(g_s)를 제공한다.

A) 스텝 1은 g_s 에 따라 D_{o2} 를 구하기 위해 반복된다.

B) 유동 속도는 다음의 식으로 산출된다.

$$V=(q_{i2}+g_s)*\text{sqrt}(X1)/(A_{i2}+A_{o2}) \quad (333)$$

$$X1=(RFPL*RFPS+D_{i2}-D_{o2})/(RFPL*RFPS) \quad (333a)$$

C) 하도 구간의 이동 시간은 다음의 식으로 산출된다.

$$TTR=RFPL/(3.6*V) \quad (334)$$

D) VSV 추적 계수는 다음의 식으로 산출된다.

$$CVSC=2.0*DTHY/(2.*TTR+DTHY) \quad (335)$$

E) 유동률은 다음의 식으로 계산된다.

$$q_{o2}=CVSC*SIA/(3600.*DTHY) \quad (336)$$

$$SIA=1800.*DTHY*(q_{i1}+q_{i2})+STH \quad (336a)$$

F) 융합은 다음의 비율로 결정된다.

$$DF=abs(q_{o2}-GS)/q_{o2}<0.001 \quad (337)$$

G) $DF>0.001$ 일 경우 A/F 스텝은 $gs=q_{o2}$ 설정으로 반복된다.

H) 융합시 하도 구간의 저류량이 업데이트 되고 이 과정(1/2 단계)은 각 시간 단계 동안 반복된다.

$$STH=SIA-q_{o2} \quad (338)$$

여기서 q_{i1} 와 q_{i2} 는 시간 구간(DTHY)의 시작과 마지막 순간에 하도 구간의 유입률($m^3 s^{-1}$), q_{i1} 와 q_{i2} 는 관련 유출률($m^3 s^{-1}$), D_{i1} 와 D_{i2} 는 유입 및 유출 깊이(m), A_{i1} 와 A_{i2} 는 유입과 유출 면적(m^2), RFPL는 하도 구간 범람원 길이(m), RFPS는 하도 구간 범람원 경사($m m^{-1}$), V는 유동 속도($m s^{-1}$), TT는 하도 구간까지의 이동 시간(h), CVSC는 VSC 추적 계수, STH는 하도 구간의 저류량(m^3), SIA는 DTHY 동안의 하도 구간 저류량에 유입되는 양(m)을 더한 값이다. 유의할 점은 VSC 모델은 수문곡선이 하도 구역을 통과할 때 수면 경도의 변화에 대한 설명을 제공한다는 것이다.

3.2 퇴적물(Sediment)

퇴적물은 수로와 범람원을 각각 통하여 추적된다. 동일한 퇴적물 추적 방정식은 일일 단위 추적 과정과 VSC법에 사용된다. 일일 단위 추적 방식을 사용할 경우 속도와 유동률은 해당 일의 평균치이며 용량은 해당 일에 대한 합계이다. VSC법이 사용될 경우 평균 속도, 유동률, 용량 및 퇴적물 이동이 각 시간 구간별로 산출된다. 따라서 VSC는 퇴적물 농도와 이동(퇴적물 그래프)의 시간 분포를 생성하게 된다. 퇴적물의 추적 방정식은 Bagnold의 퇴적물 이동 방정식(Bagnold, 1977)의 변형된 버전이다. 새로운 방정식은 속도의 함수로 이동 농도 능력을 산출한다.

$$CY_U=CY_1*VCH^{p18} \quad (339)$$

여기서 CY_U 는 유동 속도(VCH)에 대한 잠재적인 퇴적물 농도($t m^3$)이고 CY_1 은 속도 $1.0 m s^{-1}$ 에 대응하는 속도에 대한 잠재적인 퇴적물 농도이며, p18는 Bagnold 식에서 1.5로 설정된 매개변수이다. 추적 구간까지 퇴적물 유출량의 잠재적인 변화는 유입 및 잠재적인 농도 간의 차이로 산출된다.

$$YU=10.*QCH*(CY_U-CIN) \quad (340)$$

여기서 YU는 퇴적물량 내 잠재적인 변화($t \text{ ha}^{-1}$)를 의미하고, QCH는 해당 수로까지의 유동량(mm), CIN은 유입 퇴적물 농도($t \text{ m}^{-3}$)이다. YU가 음수일 경우 수로에서 퇴적이 발생한다.

$$DEP_{ch}=-YU \quad (341)$$

여기서 DEP_{ch} 는 수로 내 퇴적물의 퇴적($t \text{ ha}^{-1}$)을 의미한다. YU가 양수일 경우 수로의 퇴화는 다음의 식으로 산출된다.

$$DEG_{ch}=YU*EK*CVF \quad (342)$$

여기서 DEG_{ch} 는 수로의 퇴화($t \text{ ha}^{-1}$)를 의미하고, EK는 USLE의 토양침식 인자, CVF는 USLE의 작물피복 인자이다. 많은 자연 수로들의 경우 작물로 피복이 거의 되어 있지 않는 상태지만($0.3 < CVF < 0.8$) 안정적인 수로들은 내침식성을 가진 물질로 구성되어 있다($0.001 < EK < 0.05$). 범람원에 대한 퇴화 및 퇴적은 유사한 방식으로 산출된다. 하도 구간 출구의 퇴적물량은 다음 변화를 합산하여 산출한다.

$$Y_0=Y_I-DEP_{ch}+DEG_{ch}-DEP_{fp}+DEG_{fp} \quad (343)$$

여기서 Y_I 와 Y_0 는 유입과 유출 퇴적물량($t \text{ ha}^{-1}$)이며, fp는 범람원에서의 과정을 의미한다. 하도 구간까지 유사가 추적될 때 입자크기 분포도 변한다. APEX 모델은 입자 크기 200, 10 및 2 μm 의 모래, 미사 및 점토를 의미한다. 특정 크기 입자의 퇴적은 다음의 식으로 산출된다(Williams와 Hann, 1978).

$$Y_0(i)=Y_I(i)*PCT(i)*\exp(-B1*\sqrt{PSZ(i)}) \quad (344)$$

여기서 PCT는 유입에서 입자 크기(PSZ, μm)의 퍼센트(%), B1은 계수 그리고 첨자 i는 모래, 미사 및 점토를 의미한다. 계수 B1은 Houston Black Clay(매우 고운 질감의 점토)의 평균 입자 크기를 이용하는 식 344의 해를 구하여 결정된다.

$$B1=\ln(Y_0/Y_I)/4.47 \quad (345)$$

따라서 유출 입자의 크기는 다음의 식 344를 통해 산출된다.

$$OPCT_0(i)=PCT(i)*\exp(-B1*\sqrt{PSZ(i)}) \quad (346)$$

여기서 PCT_0 는 유출 내 입자 크기 i의 퍼센트(%)이다. 연속성을 보장하기 위하여 PCT_0 는 식 346($i=1,3$)의 합으로 나눈 값으로 수정해야 한다. 이는 PCT_0 의 합이 1이 되도록 한다.

3.3 양분(Nutrient)

질소와 인의 유기적 형태는 유사에 의해 이동하고 농축비율 접근법을 통하여

추적된다.

$$YNO=0.001*CNI*ER*YO \quad (347)$$

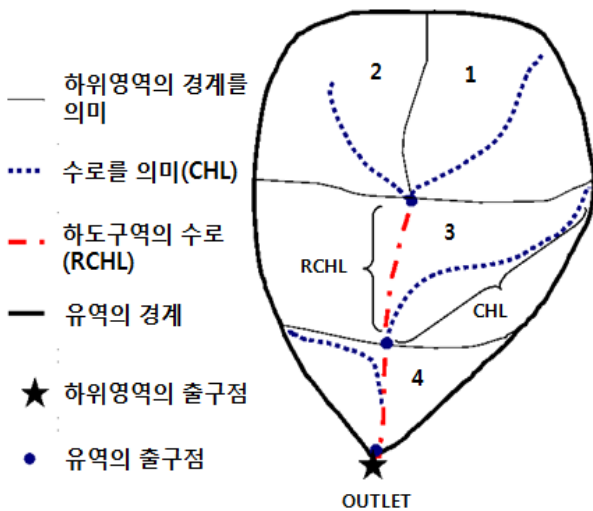
여기서 YNO는 유기 양분(질소 또는 인)의 유출량(kg ha⁻¹)을 의미하며, CNI는 유입 유기 양분 농도(g t⁻¹), ER는 농축비율(유입의 유기 양분 농도를 유출의 유기 양분 농도로 나눈 값)을 의미한다. 농축비율은 유류의 평균 퇴적물 입자 분포도를 유입의 분포도로 나눈 값의 비로서 산출된다.

$$ER=PSZM_I/PSZM_0 \quad (348)$$

여기서 PSZM_I과 PSZM₀는 유입과 유출의 평균 퇴적물 입자 크기이다. 질소와 인의 미네랄 형태는 실제보다 적게 예측된 것으로 간주되기 때문에 하도 구간으로 흘러 들어갈 때 일정한 농도를 유지한다. 미네랄 양분의 유실은 유동이 하도 구간 내에서 소실될 때에만 발생한다.

3.4 농약(Pesticides)

농약 추적법은 양분과 관련하여 설명했던 것과 동일하다. 흡착된 농약의 형태는 농축비율을 이용하여 유사와 함께 이동되며(식 347과 348) 용해성 형태는 유동과 함께 이동된다.



추적 규칙:

1. CHL = RCHL

가장 먼 상류지역을 규명

CHL: 하위 영역 출구에서 하위 영역의 최대 먼거리까지의 거리

RCHL: 추적 하도구간의 유동이 하위영역에 이르기까지의 거리. 가장 먼 지역의 경우에는 물이 하위영역을 통과하여 추적 하도구간은 물이 하위영역의 한쪽 끝에서 이동하여 하위영역을 완전히 통과하여 하위영역의 반대쪽 끝인 출구로 이동할 때로 정의된다.

2. CHL > RCHL

하류 하위영역을 규정(하위영역이 0.의 좁은 협곡일 경우 폭은 RCHL-CHL)

3. -WSA

음의 유역면적(WSA)은 저장된 정보가 추가되도록 한다(여기서 2는 3을 통과하여 추적되기 전에 1에 더해진다).

(그림 3.1) 유역 그림 및 APEX에서 추적 매커니즘을 사용하기 위한 법칙

제4장 저류지 구성 요소

제 4 장 저류지 구성 요소

저류지는 하위 영역의 출구 쪽에 위치하며 유입은 해당 하위 영역 뿐만 아니라 도움이 되는 기타 다른 하위 영역에서부터 파생된다. 저류지는 주 배수로 및 비상 배수로와 함께 설계되어 다양한 구조물을 수용한다. 저류지의 물수지는 다음의 식을 통하여 설명된다.

$$RSV=RSV_0+QI+RFRA-EV-SEP-QO \quad (349)$$

여기서 RSV_0 및 RSV 는 초기 및 최종 저류 함량(m^3), QI 는 유입률, $RFRA$ 는 웅덩이 영역의 강우율이며, EV 는 증발률, SEP 는 침윤 손실, QO 는 유출률(모두 $m^3 d^{-1}$ 로 표시)이다. $RFRA$ 를 산출하기 위하여 다음의 식을 이용할 때 EV 와 SEP 저류량은 지표면적과 관련이 있다.

$$RSSA=bv1*RSV^{bv2} \quad (350)$$

여기서 $RSSA$ 는 저류지 지표면적(ha), $bv1$ 와 $bv2$ 는 주 배수로와 비상 배수로의 고도에 대한 입력값에서 파생된 계수이다. 하루가 시작될 때의 지표면적($RFRA$)을 고려할 때 EV 와 SEP 는 다음의 식으로 산출한다.

$$RFRA=10.*RFV*RSSA \quad (351)$$

$$EV=10.*CLE*EO*RSSA \quad (352)$$

$$SEP=10.*DT*RSHC*RSSA \quad (353)$$

여기서 RFV 는 강우율($mm d^{-1}$), CLE 는 호수 증발 계수(0.6), EO 는 잠재 증발산($mm d^{-1}$), DT 는 시간 간격(24 h), $RSHC$ 는 저류지 바닥의 수리 전도도($mm h^{-1}$)이다. 유출은 2가지 배수로를 통해 통제된다.

$$QO=RSV-RSVE; RSV>RSVE \quad (354)$$

$$QO=RR*DT; RSVP<RSV<RSVE \quad (354a)$$

$$QO=0.0; RSV<RSVP \quad (354b)$$

여기서 $RSVE$ 와 $RSVP$ 는 비상 및 주 배수로에 저류지 저장량(m^3)을 의미하며, RR 는 주 배수로를 통과하는 유량($m^3 d^{-1}$)을 의미한다.

퇴적물량은 물질 균형식을 이용하여 매일 산출된다.

$$RSY=RSY_0+YI-YO-DEP \quad (355)$$

여기서 RSY_0 및 RSY 는 초기 및 마지막 저류지의 퇴적물량을 의미하며, YI 및 YO 는 유사의 유입 및 유출, DEP 는 유사의 퇴적(모두 t)이다. 다음의 식에 따르면 유사는 저류지에 가라앉는다.

$$CY=(CY_0-CY_N)*\exp(-bv_3*DT)+CY_N \quad (356)$$

여기서 CY_0 및 CY 는 하루의 시작 및 마지막 순간에 저류지의 퇴적물 농도($t \ m^{-3}$), CY_N 는 침강 이후의 정상적인 농도, bv_3 는 퇴적 계수이다. bv_3 값은 퇴적물 농도를 유거수 사상 이후에 정상 수준으로 회복시키는데 필요한 시간에 따라 결정된다.

$$bv_3=\ln((CY-CY_N)/(CY_0-CY_N))/TDP \quad (357)$$

여기서 TDP 는 정상 농도로 돌아가는데 필요한 시간(d)이고, $(CY-CY_N)/(CY_0-CY_N)=0.01$ 이다. 다음의 식으로 퇴적량은 농도 변화를 통하여 결정된다.

$$DEP=RSV*(CY-CY_0) \quad (358)$$

저류지의 퇴적물 유출은 다음의 식으로 산출된다.

$$Y_0=CY*Q_0 \quad (359)$$

유기 인 및 질소는 퇴적물 입자를 통하여 저류지에서 이동된다. 유기 양분 농도는 다음의 식으로 매일 계산된다.

$$RSON=RSON_0+YON_1-YON_0-DPON \quad (360)$$

여기서 $RSON_0$ 및 $RSON$ 는 초기 및 마지막 유기 질소 함량(kg)이며, YON_1 및 YON_0 는 유기 질소의 유입 및 유출률($kg \ d^{-1}$), $DPON$ 은 유기 질소의 퇴적률($kg \ d^{-1}$)이다. 퇴적률은 다음의 식으로 산출된다.

$$DPON=CON*DEP \quad (361)$$

여기서 CON 는 유사 내 유기 질소의 농도($kg \ t^{-1}$)를 의미한다. 유기 질소 함량과 퇴적물 농도의 비로 CON 을 결정한다.

$$CON=(RSON_0+YONI)/(RSY_0+YI) \quad (362)$$

유기 질소 유출률은 식 361에 의해 산출된다.

$$YON_0=CON*Y_0 \quad (363)$$

용존 질소와 인은 실제 수치보다 적게 예측된 것으로 간주되고 일일 함량은 물질 균형식을 통해 산출된다.

$$RSSN=RSSN_0+QNI-QNO \quad (364)$$

여기서 $RSSN_0$ 및 $RSSN$ 는 용존 질소의 초기 및 마지막 함량(kg)을 의미하고 QNI 및 QNO 는 용존 질소의 유입 및 유출률($kg \ d^{-1}$)을 의미한다. 유출률은 유동과 농도의 곱이다.

$$QNO=CSN*Q_0 \quad (365)$$

저류지 내 용존 질소 농도인 CSN(kg m³)는 완전 혼합이 이루어진다는 가정 하에 산출된다.

$$CSN=(RSSN+QNI)/RSV \quad (366)$$

유사한 산출과정이 용존 인에도 수행된다.

제5장 지하수 구성 요소

제 5 장 지하수 구성 요소

지하수의 질량 균형 방정식은 다음과 같다.

$$GWST=GWST_0+QV+SEP-DPRK-RSSF \quad (367)$$

여기서 $GWST_0$ 와 $GWST$ 는 해당 일의 시작과 마지막 순간의 지하수량(mm)을 의미하고, QV 는 근권 삼투률(mm d^{-1}), SEP 는 저류지의 침윤률(mm d^{-1}), $DPRK$ 는 지하수 저류지에서의 침윤률(mm d^{-1}), $RSSF$ 는 복귀류 속도(mm d^{-1})이다. $DPRK$ 와 $RSSF$ 손실은 지하수의 저류지 체류 시간과 분할 계수를 통하여 산출된다.

$$DPRK+RSSF=GWST*(1.0-\exp(-1.0/RFTT)) \quad (368)$$

여기서 $RFTT$ 는 지하수의 저류지 체류 시간(d)을 의미한다. $DPRK$ 와 $RSSF$ 의 분할은 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$RSSF=RFPK*(DPRK+RSSF) \quad (369)$$

여기서 $RFPK$ 는 분할 계수이며 식 368을 식 369로 대체하여 다음을 얻을 수 있다.

$$RSSF=RFPK*GWST*(1.0-\exp(-1.0/RFTT)); GWST>GWSTH \quad (370)$$

$$RSSF=0.0; GWST<GWSTH \quad (370a)$$

여기서 $GWSTH$ 는 임계 저류량(mm)을 의미한다. 비록 복귀수가 저류량의 임계치 보다 낮을 때 멈추게 되지만 깊은 침투는 계속된다.

용존 질소는 실제보다 낮게 예측되는 것으로 간주하고 일일 함량은 질량 균형 발전식을 통하여 산출된다.

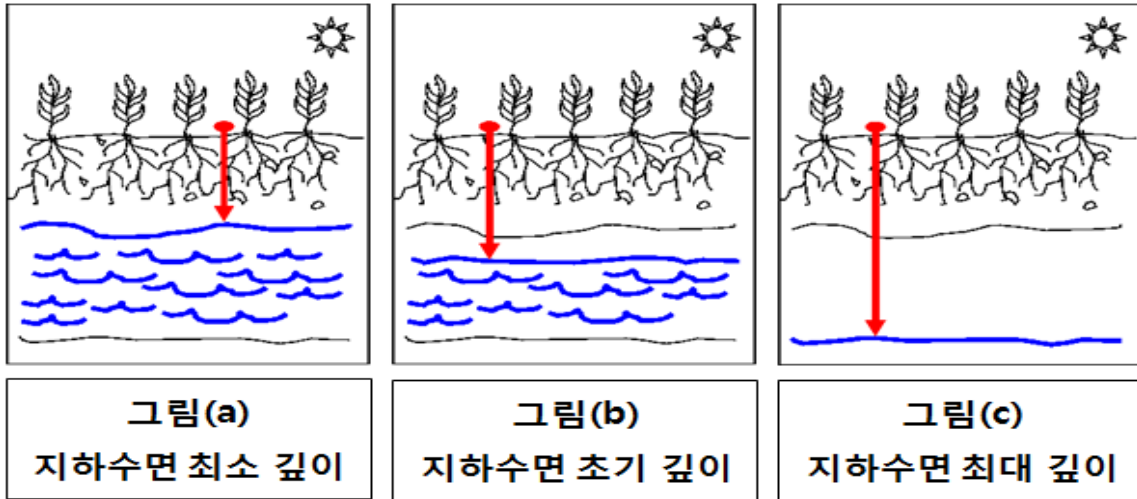
$$GWSN=GWSN_0+RZLN-RSFN-GWLN \quad (371)$$

여기서 $GWSN_0$ 와 $GWSN$ 는 초기와 마지막 용존 질소 함량(kg ha^{-1})을 의미하고 $RZLN$ 은 권근의 질소 침출 비율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), $RSFN$ 은 복귀류의 질소 비율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), $GWLN$ 은 지하수의 질소 침출 비율($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)을 의미한다. 복귀류와 침출되는 질소의 비율은 유동률과 지하수의 질소 농도의 곱이다.

$$RSFN=CGWN*RSSF \quad (372)$$

$$GWLN=CGWN*DPRK \quad (373)$$

여기서 $CGWN$ 은 지하수 내 질소의 농도(kg mm^{-1})이다.



(그림 5.1) 지하수면 깊이 그림

제6장 방목 구성 요소

제 6 장 방목 구성 요소

모든 하위 영역은 소유번호로 식별되는데 각 소유주는 가축 및 가금류를 소유하고 있을 수 있다. 소유주는 최대 10개의 가축군을 소유할 수도 있다. 각 무리의 식별 속성은 사료 섭취율($\text{kg head}^{-1} \text{d}^{-1}$), 방목 효율(짓밟음에 의해 발생하는 폐기물 고려), 가축분뇨 생산율($\text{kg head}^{-1}\text{d}^{-1}$), 오줌 생성 비율($\text{kg head}^{-1} \text{d}^{-1}$), 가축분뇨 내 탄소, 용존 및 유기 질소와 인 비율 등을 포함한다. 따라서 예를 들어 소유주는 한 하위 영역 내에 채이장에 가둬놓은 낙농 가축 무리, 여러 하위 영역에서 방목하는 식용 암소-송아지 무리, 여러 하위 영역에서 방목하는 거세 수소 무리(일부는 식용 암소-송아지 무리와 동일 장소에서 방목할 수도 있음)와 여러 하위 영역에서 방목하는 교체 미경산우 무리를 보유하고 있을 수 있다. 또한 소유주는 해당 구역 내에 위치하지만 수 km 떨어진 곳에 또 다른 농장을 소유하고 있을 수도 있다. 동물들은 농장에서 다른 농장으로 이동될 수도 있고 아닐 수도 있다. 언제든지 오직 하나의 가축 무리만이 한 하위 영역을 점유할 수 있다. 여러 하위 영역에서 이루어지는 윤환 방목은 사용자의 통제 하에 APEX 모델에 의해 자동으로 수행된다. 본 모델은 윤환 방목을 시행하고 추적하는 과정에 대한 내용을 다룬다. 예를 들어 식용 암소-송아지 무리는 거세 수소 무리보다 앞서 윤환되어 항상 최상의 사료를 얻을 수 있도록 할 수 있다. 복잡한 방목 체계는 각 무리별 두 수, 각 하위 지역에서 방목할 자격이 있는 무리 식별 번호 (방목 우선 순위별), 각 하위영역에서 각 무리에 대한 방목 하한치(지상 바이오매스, t ha^{-1}) 등을 표시하여 생성된다. 막힌 곳이 없거나 동물들이 매일 일정 시간 동안만 간헐있는 형태의 방목일 경우 소유주의 하나 이상 하위 영역을 특정 무리에 대해 측정 시간 동안 허용된 방목 지역으로 지정해야 한다. 방목을 위해 지정된 지역이고 방목이 하위 영역의 작업 스케줄에 따라 시작된다면 어떠한 지역도 방목을 위해 사용될 수 있다. 어느 하위 영역이든지 운영 스케줄 내에서 방목을 중단할 수 있다. 방목을 시작하고 중지할 때 수확 후의 옥수수 수염을 먹이는 것도 좋다. 하위 영역이 하한치에 이르렀을 때 방목은 자동으로 멈추게 된다. 소유주가 다른 적합한 방목지를 소유하고 있을 경우 가축들은 지상 바이오매스를 가장 많이 포함하고 있는 곳으로 자동적으로 이동된다. 소유주가 더 이상의 적합한 방목지를 가지고 있지 않을 경우 가축들은 과도 방목된 해당 지역에 머무르게 되고 보충 급여가 이루어진다. 이러한 윤환 방목 과정은 모의하는 전체 기간 동안 지속된다. 본 방목 시스템은 사방이 막히거나 또는 부분적으로 막힌 지역에서의 먹이주기, 집약 윤환 방목, 수확 후 농경지 방목 등에 대한 유연성을 제공한다.

6.1 가축분뇨 관리(Manure Management)

가축분뇨는 고체 또는 액체 형태로 사용될 수 있다. 막힌 형태의 채이장은 채이장으로부터의 유출수와 헛간에서 사용된 세척수를 받아내기 위해 인공 연못을 포함하고 있을 수 있다. 이 인공 연못은 본 모델에 의해 정상 및 최대량을 고려하여 자동으로 지정된다. 정상과 최대량 사이의 저류량은 계획 강우량에서 유출수 및 30일 동안의 세척수를 포함하도록 설정된다. 계획 강우량은 평균 월별 강우량의 가장 큰 값의 2배에 해당하고 유출수는 NRCS 유출 곡선 지수가 90이라는 가정 하에 산출할 수 있다. 정상적인 양은 최대 양에서 사용자가 제공하는 비율에 해당하는 양이다. 인공 연못에서 나온 오수는 액체 가축분뇨를 사용하기 위해 지정된 농경지로 자동으로 시용된다. 액체 가축분뇨 이용에는 다음과 같은 규칙이 따른다. 첫째 펌핑은 인공 연못의 용량이 최대와 정상 인공 연못 용량 간의 차이분인 0.75를 초과할 때 시작된다. 둘째, 펌핑 속도는 사용자가 설정한 일수에 따라 최대량에서 정상 수준으로 인공 연못의 용량을 줄이기 위해 설정된다. 셋째, 펌핑은 사용자가 설정한 일자에 시작될 수도 있는데 이는 강우량이 많은 계절 또는 겨울 전이다. 고체형 가축분뇨는 채이장에서 사용자가 설정한 주기에 따라 자동적으로 긁어내서 설정된 지역에 자동으로 시용되기 위해 비축된다. 소유자는 원하는 수만큼 구매받지 않고 고체 가축분뇨 시용 장소를 가질 수 있다. 시용이 시작되었을 때(지정된 속도로 제공할 만큼 비축량이 충분할 때) 가축분뇨는 토양 상단에서 50 mm 지점에 용존 인 함량이 제일 낮은 지역에 시용된다. 막혀있는 채이장의 가축분뇨 관리에 대한 모의를 제공하는 것 이외에 본 모델에서는 외부 공급원을 통해 얻은 가축분뇨를 사용하는 것도 가능하다. 이러한 적용은 특정 일자에 또는 일정한 주기로 자동으로 진행될 수도 있다. 자동 적용 방식은 고정 비율에 따르거나 (질소 비율, 인 비율 또는 기타), 토양의 용존 인 함량에 따라 다르게 적용될 수도 있다. 질소와 인 비율은 작물 수확시 농경지에서 제거된 질소와 인의 양을 의미한다. 가변적 적용 모드에서 본 모델은 매년 초에 토양의 표본 조사를 시행하고 입력된 임계값과 함께 규칙에 따라 비율을 조정한다. 다음은 설정된 규칙의 예이다. 토양 상부 50 mm내 용존 P 농도가 <math><60 \text{ ppm}</math>-시용 비율= $2.*P$ 비율; 용존 인 <math><120 \text{ ppm}</math>; 비율= $1.5*P$ 비율; 용존 인 <math><200 \text{ ppm}</math>-비율= P 비율; 용존 P >math>200 \text{ ppm}</math>-비율=0. 또한 가축분뇨는 방목하는 가축에 의해 제공된다. 본 가축분뇨 관리 모델은 막혀있는 장소에서의 먹이공급(인공 연못 유/무)에서 방목뿐만 아니라 외부 공급원을 통한 가축분뇨 등 다양한 시스템에 대한 모의를 제공할 수 있는 충분한 유연성을 가지고 있다. 가축분뇨 생산($\text{kg head}^{-1} \text{ d}^{-1}$)과 구성요소(미네랄 및 유기 질소와 인)가 투입물이 되기 때문에 소, 돼지 및 가금류를 포함한 다양한 가축이 고려 대상이 될 수 있다. APEX 모델은 유출수, 토양 침식 및 가축분뇨 침식 등에 대해 모의한다. 추적 메카니즘은 용존 양분의 물을 통한 이동, 유사에 의한 유기 양분의 이동 및 물에 의한 가축분뇨 이동 등에 대한 모의한다.

APPENDIX A:

NOTATIONS

a1	Coefficient in wind speed equation.
a2	Exponent in wind speed equation.
A2	Cross sectional area in m^2 at the toe of the downstream dike.
A3	Cross sectional area in m^2 at the toe of the upstream dike.
AB	Soil albedo.
ABCO2	Allocation from biomass to CO_2 ; 0.6 (surface layer), $0.85-0.068*(CLA+SIL)$ (all other layers).
ABD	Average soil bulk density of the profile in $t\ m^{-3}$.
ABL	Carbon allocation from biomass to leaching.
ABP	Allocation from biomass to passive humus; 0 (surface layer), $0.003+0.00032*CLA$ (all other layers).
ad	Crop parameter that governs LAI decline rate.
AD	Air density in $kg\ m^{-3}$.
ADRF	Accumulated 30 day rainfall in mm.
AEP	Total plant water use rate in $mm\ d^{-1}$.
AG	Acceleration of gravity in $m\ s^{-2}$.
AGPM	Standing live and dead plant material in $t\ ha^{-1}$.
ah1,2	Crop parameters relating HUF and HUI.
A _{i2}	Cross sectional area in m^2 for flow q_{i2} .
AJHI	Simulated potential harvest index.
AKN	Nitrification regulator.
AKV	Volatilization regulator.
ALMCO2	Allocation from metabolic litter to CO_2 0.6 (surface layer), 0.55 (all other layers).
ALO	Maximum ALS value a crop tolerate without stress in %.

alp	Maximum fraction of total rainfall that occurs during TC.
alp.5	Maximum fraction of total rainfall that occurs during 0.5 h.
alp.5u	Upper limit of alp.5.
ALS	Soil layer Al saturation in %.
ALSLCO2	Allocation from lignin of structural litter to CO ₂ 0.3.
ALSLNCO2	Allocation from non-lignin of structural litter to CO ₂ 0.6 (surface layer), 0.55 (all other layers).
ALT	Al tolerance index number for a crop.
ANG	Clockwise angle between field length and north in radians.
Ao2	Cross sectional area in m ² for flow q _{o2} .
APCO	Allocation from passive humus to CO ₂ 0.55.
AR	Aerodynamic resistance for heat and vapor transfer in s m ⁻¹ .
ar1,2	Crop parameters used to partition root weight as a function of total biomass and HUI
AS	Aeration stress factor for a crop.
ASCO2	Allocation from slow humus to CO ₂ 0.55.
ASP	Allocation from slow humus to passive; 0 (surface layer), 0.003-0.00009xCLA (all other layers).
ASPR	Mineral P flow rate between the active and stable pools in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
ATMN	Absolute value of TMN.
ATS	Root growth Al toxicity stress factor.
AVT	Long-term average annual air temperature in °C.
AX	Furrow cross sectional area in m ² .
b1	Probability of a wet day following a dry day divided by probability of a wet day.
B1	Parameter in sediment particle size equation.
b2	Temperature for wet and dry days.
b3	Ratio of mean solar radiation on wet days to mean solar radiation on dry days.
bc1,2	Crop parameters relating RUE and CO ₂ .

BCV	Lagging factor for simulating residue and snow cover affects on surface temperature.
BD	Soil layer bulk density in $t m^{-3}$.
BD3	Bulk density for 33 kPa water content in $t m^{-3}$.
BDD	Bulk density of the oven dry soil in $t m^{-3}$.
BDP	Soil layer tillage/compaction affected bulk density in $t m^{-3}$.
BDPo	Bulk density in a soil layer before tillage in $t m^{-3}$.
be1	Coefficient in enrichment ratio equation.
be2	Exponent in enrichment ratio equation.
bf1,2	Winter dormancy temperature crop parameters.
bh1	Parameter relating mean relative humidity for wet and dry days.
bi	Rainfall interception constant
BMC	Weight of C in soil microbial biomass and associated products in $kg ha^{-1}$.
BMCTP	Potential C transformation rate in microbial biomass in $kg ha^{-1} d^{-1}$.
BMN	Weight of N in soil microbial biomass and associated products in $kg ha^{-1}$.
BMNTP	Potential N transformation rate in microbial biomass in $kg ha^{-1} d^{-1}$.
BMR	Transformation rate of microbial biomass and associated products under optimal conditions surface = $0.0164 d^{-1}$ all other layers = $0.02 d^{-1}$ (Parton et al., 1993, 1994)
bn1,2,3	Crop parameters expressing optimal N concentration as a function of crop development (HUI).
bp1,2,3	Crop parameters expressing optimal P concentration as a function of crop development.
bq	Runoff coefficient in rational equation.
br1,2	root growth parameters dependent upon soil texture
bsa	Mineral P flow coefficient.
BSA	Soil layer base saturation in %.
bsl	A fraction of the storage PO occupied by percolating water.
bv1,2	Parameters in reservoir volume-surface area equation.
bv3	Parameter in reservoir sediment deposition equation.

BW	Furrow bottom width in m.
bw1	Parameter in mean wind speed equation.
bw2	Parameter in mean wind speed equation.
bwn(1)	Wind erosion crop specific coefficient for STL
bwn(2)	Wind erosion crop specific coefficient for STD
bwn(3)	Wind erosion crop specific coefficient for RSD
bx	Crop parameter in Penman-Monteith PET equation
BXCT	Rate of change in annual rainfall from east to west in mm km^{-1} .
BYCT	Rate of change in annual rainfall from south to north in mm km^{-1} .
CAC	Soil layer CaCO_3 concentration in g t^{-1} .
CAF	Critical aeration factor for a crop.
CBW	Channel bottom width in m.
CEC	Soil layer cation exchange capacity.
Cf	Carbon fraction of organic materials (0.42; from data of Pinck et al., 1950)
CGWN	Concentration of N in the groundwater in kg mm^{-1} .
CHMX	Maximum potential crop height in m.
CHN	Manning's n value of a channel.
CHP	Wetted perimeter of a channel in m.
CHS	Channel slope in m m^{-1} .
CHT	Crop height in m.
CHXA	Channel cross sectional area at top bank in m^2 .
CIN	Inflow sediment concentration in t m^{-3} .
CLA	Clay content in soil layer in %.
CLE	Lake evaporation coefficient.
CLP	Concentration of labile P in the soil layer in g t^{-1} .
CMP	Humus mineralization rate constant in d^{-1} .

CN ₁	SCS runoff curve number for moisture condition 1 (dry).
CN ₂	SCS runoff curve number for moisture condition 2 (average).
CN _{2s}	CN ₂ value adjusted for watershed slope.
CN ₃	SCS runoff curve number for moisture condition 3 (wet).
CNI	Inflow organic nutrient concentration in g t ⁻¹ .
CNO ₃	Concentration of NO ₃ -N in kg mm ⁻¹ .
CNR	C/N ratio of standing dead crop residue.
CO ₂	Atmospheric carbon dioxide concentration in g m ⁻³ .
CON	Concentration of organic N in g t ⁻¹ .
CP	Concentration of P in the top soil layer in g t ⁻¹ .
CPHT	Crop height in m.
CPRH	Fraction of inflow partitioned to horizontal pipe flow.
CPRV	Fraction of inflow partitioned to vertical pipe flow.
CPVH	Horizontal pipe flow rate in mm d ⁻¹ .
CPVV	Vertical pipe flow rate in mm d ⁻¹ .
CR	Canopy resistance for vapor transfer in s m ⁻¹ .
CS	Factor controlling biological processes.
CSN	Soluble N concentration in the reservoir in kg m ⁻³ .
CSP	Soil layer concentration of labile P in g t ⁻¹ .
CSS	Channel side slope in m m ⁻¹ .
CTW	Channel top width in m.
CU	Product of all RGF values above depth Z.
CV	Weight of all above ground plant material in t ha ⁻¹ .
CVF	USLE crop management factor.
CVRS	Aboveground crop residue in t ha ⁻¹ .
CVSC	VSC routing coefficient.

CY	sediment concentration in $t\ m^{-3}$.
CY ₀	Reservoir sediment concentration in $t\ m^{-3}$ at the start of a day.
CY ₁	Potential sediment concentration for $1.0\ m\ s^{-1}$ velocity.
CY _N	Normal sediment concentration in a reservoir in $t\ m^{-3}$.
CY _U	Potential sediment concentration in $t\ m^{-3}$ for the flow velocity VCH.
d	flow depth in m.
D	Distance between the subarea centroid and the storm center in km.
D ₂	Water depth in m at the toe of the downstream dike.
D ₃	Water depth in m at the toe of the upstream dike.
DD	Soil temperature damping depth in m.
DDM	Daily potential increase in biomass in $t\ ha^{-1}$.
DECR	Decay rate constant for fresh organic P in d^{-1} .
DEG _{ch}	Channel degradation in $t\ ha^{-1}$.
DEG _{fp}	Floodplain degradation in $t\ ha^{-1}$.
DEP	Sediment deposition in a reservoir in t.
DEP _{ch}	Sediment deposition in the channel in $t\ ha^{-1}$.
DEP _{fp}	Sediment deposition in the floodplain in $t\ ha^{-1}$.
DH	Furrow dike height in m.
DH ₀	Dike height in m before settling.
dHUF	Daily change in HUF.
DI	Water surface distance between dikes in m.
Di2	Inflow depth in m for q_{i2} .
DIAM	Soil particle diameter in m.
DKIN	Distance between dike centers in m.
DLT	Slope of the saturation vapor pressure curve in $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$.

DM	Total crop biomass in t ha^{-1} .
DMN	Plant N demand in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
DMP	Plant P demand in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
DN	Denitrification rate in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
D_{o_2}	Outflow depth in m for q_{o_2} .
DP	Maximum damping depth for the soil in m.
DPON	Organic N reservoir deposition rate in kg d^{-1} .
DPRK	Percolation rate from the groundwater storage in mm d^{-1} .
DQ	Volume of rainfall excess in mm for the time interval.
DR	Sediment delivery ratio (sediment yield divided by gross sheet erosion).
dRFV	rainfall amount in mm during a time interval DT in h.
DSB	Change in base saturation needed to raise soil PH to 6.5.
DST0	Soil surface temperature in $^{\circ}\text{C}$.
DT	Time interval in h.
DT	Reservoir routing time interval in h.
DTHY	Routing time interval in h.
DU10	Wind speed in m s^{-1} .
DUR	Storm duration in h.
DVOL	Furrow dike volume in mm.
DX	Furrow flow depth in m.
DZ	Soil layer thickness in m.
EA	Saturation vapor pressure at mean air temperature in kPa.
EAJ	Soil cover index.
ECEC	Effective cation exchange capacity in $\text{cmol(p+)} \text{kg}^{-1}$.
ECF	Correction factor that preserves long-term mean rainfall.

ED	Vapor pressure at mean air temperature in kPa.
EF	Tillage mixing efficiency.
EI	USLE rainfall energy factor.
EK	USLE soil erodibility factor.
ELEV	Elevation of the site in m.
ENO3	Amount of NO ₃ -N in kg ha ⁻¹ moved upward by soil water evaporation.
EO	Potential evaporation in mm d ⁻¹ .
EO'	Potential evaporation rate in mm d ⁻¹ adjusted for rainfall interception.
EP	Potential plant evaporation rate in mm d ⁻¹ .
ER	Enrichment ratio (organic N concentration in sediment to that of the top soil).
ES	Potential soil water evaporation rate in mm d ⁻¹ .
ESR	Potential soil evaporation remaining after snow and litter evaporation in mm.
EV	Evaporation from the reservoir in m ³ .
EVZ	Total potential soil water evaporation in mm.
EXPK	Power parameter in modified exponential rainfall distribution.
f	Infiltration rate in mm h ⁻¹ .
F	Rainfall frequency of occurrence.
FBIO	RUSLE growing biomass factor.
FC	Field capacity soil water content (33 kPa for many soils) in mm.
FD	Mean wind unsheltered travel distance factor.
FDSF	Furrow dike safety factor.
FFC	Fraction of field capacity soil water storage.
FFC'	Depth weighted FFC value.
FGC	Fraction ground cover by the growing crop.
FHR	Winter dormancy day length reduction factor.
FI	Soil erodibility factor of the Woodruff and Siddoway (1965) model in t ha ⁻¹ .

FI1	Dimensionless soil erodibility factor of the new model.
FL	Field length in km.
FN	N fertilizer application rate in kg ha^{-1} .
FOP	Fresh organic P in crop residue in kg ha^{-1} .
FP	Amount of pesticide that is intercepted by plants g ha^{-1} .
FP0	Pesticide on the plants at the start of the day in g ha^{-1} .
FPL	Floodplain length in km.
FPN	Manning's n value in a floodplain.
FPS	Floodplain slope in m m^{-1} .
FPW	Floodplain width in m.
FR	Soil layer content of fresh crop residue in t ha^{-1} .
FRF	Wind erosion surface roughness factor.
FRSD	RUSLE crop residue factor.
FRUF	RUSLE soil random roughness factor.
FT	Accumulated infiltration in mm.
FTM	Winter dormancy cold temperature reduction factor.
FV	Wind erosion vegetative cover factor.
FW	Field width in km.
FWV	Wind speed function in $\text{mm d}^{-1} \text{kPa}^{-1}$.
GC	Fraction of the ground that is covered by plants.
GMA	Psychomotor constant in $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.
GP	Amount of pesticide that reaches the ground in g ha^{-1} .
GP ₀	Pesticide in the soil at the start of the day in g ha^{-1} .
GSI	Crops leaf resistance in s m^{-1} .
GWLN	Groundwater N leaching rate in kg d^{-1} .

GWMX	Maximum groundwater storage in mm.
GWSN	Soluble N content of groundwater in kg.
GWSN ₀	Soluble N content of groundwater at the start of a day in kg.
GWST	Groundwater storage volume in mm.
GWST ₀	Groundwater volume at the start of a day in mm.
GWSTH	Groundwater threshold storage in mm.
HCL	Horizontal saturated flow rate in mm h ⁻¹ .
HE	Machine harvest efficiency.
HI	Optimal harvest index for a crop.
HIA	Harvest index used to estimate yield of a crop.
HIMN	Minimum value of harvest index.
HIP	Potential value of harvest index.
HIT	Harvest index as a function of heat unit accumulation
HLP	Pesticide half life on the plants in d.
HLS	Pesticide half life in the soil in d.
HMP	Humus P mineralization rate in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
HMX	Maximum height for a particular crop in m.
HPC	Weight of C present in passive humus in kg ha ⁻¹ .
HPCTP	Potential C transformation rate in passive humus in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
HPN	Weight of N present in passive humus in kg ha ⁻¹ .
HPNTP	Potential N transformation rate in passive humus in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
HPR	Passive humus transformation rate under optimal conditions (subsurface layers = 0.000012 d ⁻¹) (Parton et al., 1993, 1994)
HRLT	Day length in h.
HSC	Weight of C present in slow humus in kg ha ⁻¹ .
HSCTP	Potential C transformation rate of slow humus in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .

HSN	Weight of N in slow humus in kg ha^{-1} .
HSNTP	Potential N transformation rate in slow humus in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
HSR	Slow humus transformation rate under optimal conditions (all layers= 0.0005d^{-1}) (Parton et al., 1993, 1994; Vitousek et al., 1993)
HST	Soil water storage in a soil layer for half SPLG in mm.
HU	Number of heat units accumulated during a day in $^{\circ}\text{C}$.
HUF	Heat unit factor.
HUI	Heat unit index (accumulated HU/PHU).
HUI _D	Value of HUI when LAI starts declining.
HV	Latent heat of vaporization in MJ kg^{-1} .
IDA	Day of the year.
IPST	Growing season length in d.
k	Decay constant in exponential rainfall rate distribution in h.
KD	P sorption coefficient (P concentration of the sediment divided by that of the water in $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).
KOC	Linear adsorption coefficient for organic carbon.
L	Channel length from the most distant point to the watershed outlet in km.
LAG	Soil temperature lag coefficient (considers previous day's temperature).
LAI	Leaf area index of the crop.
LAI'	LAI at the end of the day.
LAI ₀	LAI at the beginning of the day.
Lc	Average channel flow length for the watershed in km.
Lca	Distance from the outlet along the channel to the watershed centroid in km.
LM	Weight of metabolic litter in kg ha^{-1} .
LMC	Weight of C in metabolic litter in kg ha^{-1} .
LMCTP	Potential transformation of C in metabolic litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
LMF	Fraction of the litter that is metabolic.

LMN	Mass of N in metabolic litter in kg ha^{-1} .
LMNF	Fraction of metabolic litter that is N in kg kg^{-1} .
LMNTP	Potential transformation of N in metabolic litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
LMR	Metabolic litter transformation rate under optimal conditions (surface = 0.0405 d^{-1} all other layers = 0.0507 d^{-1}) (Parton et al., 1994)
LPF	Labile P uptake factor--allows optimum uptake rates when CSP is above 20 g t^{-1} .
LS	Weight of structural litter in kg ha^{-1} .
LSC	Weight of C in structural litter in kg ha^{-1} .
LSCTP	Potential transformation of C in structural litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
LSF	Fraction of the litter that is structural.
LSL	Weight of lignin in structural litter in kg ha^{-1} .
LSLCTP	Potential transformation of C in lignin of structural litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
LSLF	Fraction of structural litter that is lignin in kg kg^{-1} .
LSLNCTP	Potential transformation of C in non-lignin structural litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
LSN	Weight of N in structural litter in kg ha^{-1} .
LSNF	Fraction of structural litter that is N in kg kg^{-1} .
LSNTP	Potential transformation of N in structural litter in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
LSR	Structural litter potential transformation rate under optimal conditions (surface = 0.0107 d^{-1} all other layers = 0.0132 d^{-1}) (Parton et al., 1994)
MPR	Mineral P flow rate in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
n	Manning's channel roughness factor.
ND	Number of days in a month.
NDD	Number of dry days in a month.
NSA	Number of subareas in the watershed.
NWD	Number of wet days in a month.
NY	Rainfall record length in y.
O	Percolation flow rate for a soil layer in mm d^{-1} .

OFV	Overland flow velocity in m s^{-1} .
OX	Oxygen factor controlling biological processes as a function of depth.
P(W D)	Probability of a wet day following a dry day.
P(W W)	Probability of a wet day after a wet day.
p1	Parameter in Penman-Monteith PET equation.
p14	Ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ runoff concentration to that of percolate.
p18	Exponential parameter in Bagnold's sediment transport equation.
p2	Threshold bulk density for root stress for a soil of zero sand content.
p24	Ratio of pesticide concentration in runoff to that of percolate.
p31	Sediment routing exponent ranging from 1.0 to 1.5.
p5	Fraction of wilting point--lower limit of plant water use.
p7	Weights N fixation between basic estimate and plant N demand.
p73	Parameter in hydrograph development equation.
p9	Threshold 30-day rainfall amount for pest damage in mm.
PAEF	Pesticide application efficiency.
PAPE	Effective amount of pesticide applied in kg ha^{-1} .
PAPR	Actual amount of pesticide applied in kg ha^{-1} .
PAR	Intercepted photosynthetic active radiation in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.
PB	Barometric pressure in kPa.
PCH	Pesticide concentration in horizontal flow in g t^{-1} .
PCT	Sediment particle size distribution in %.
PCTO	Outflow sediment particle size distribution in %.
PCV	Pesticide concentration in vertical flow in g t^{-1} .
PE	USLE erosion control practice factor.
PH	Soil layer pH.
PO	Soil porosity volume in mm.

PO ₁	Porosity minus field capacity of the top 1 m of soil in mm.
PSP	P sorption coefficient.
PSQC	Pesticide concentration in the water in g t ⁻¹ .
PST	Minimum pest factor value for a crop.
PSTD	Daily pest index.
PSTE	Pesticide kill fraction.
PSTF	Simulated pest factor.
PSTL	Amount of pesticide leached in g ha ⁻¹ .
PSTS	Accumulated daily pest index.
PSTX	Pest damage scaling factor.
PSTY	Pesticide yield adsorbed to the sediment in kg ha ⁻¹ .
PSYC	Concentration of adsorbed pesticide in g t ⁻¹ .
PSZM _I	Mean sediment particle size of the inflow in um.
PSZM _O	Mean sediment particle size of the outflow in um.
PW	Probability of a wet day.
PX	Furrow wetted perimeter in m.
Q	Runoff volume in mm.
q	Flow rate in m ³ s ⁻¹ .
q _c	Average flow rate in m ³ s ⁻¹ .
q _{c1}	Average flow rate from a 1-ha area in mm h ⁻¹ .
q _{c'}	Average flow rate in mm h ⁻¹ .
QCH	Volume of flow through a reach channel in mm.
q _{cp}	Channel capacity in m ³ s ⁻¹ .
q _{fp}	Floodplain flow rate in m ³ s ⁻¹ .
QH	Horizontal flow rate in soil layer in mm d ⁻¹ .

q_{hy}	Subarea hydrograph outflow rate in $m^3 s^{-1}$.
QI	Inflow rate in $mm d^{-1}$ or $m^3 d^{-1}$.
q^{i1}	Reach inflow rate in $m^3 s^{-1}$ at the start of the routing interval.
q_{i2}	Reach inflow rate in $m^3 s^{-1}$ at the end of the routing interval.
QNI	Soluble N reservoir inflow rate in $kg d^{-1}$.
QNO	Soluble N reservoir outflow rate in $kg d^{-1}$.
QNO3	Amount of NO_3-N lost from a soil layer by runoff and leaching $kg ha^{-1}$.
QO	Outflow from reservoir in m^3 .
q_{o1}	Reach outflow rates in $m^3 s^{-1}$ at the start of the routing interval.
q_{o2}	Reach outflow rates in $m^3 s^{-1}$ at the end of the routing interval.
q_p	Peak runoff rate in $m^3 s^{-1}$.
$q_{p'}$	TR-55 peak rate per unit of rainfall in h^{-1} .
QPX	Furrow irrigation flow rate in $mm h^{-1}$.
QPX'	Furrow irrigation flow rate in $m^3 s^{-1}$.
QRF	Quick return flow rate in $mm d^{-1}$.
QT	Percolation volume in mm.
QV	Vertical flow rate in soil layer in $mm d^{-1}$.
QXM	Irrigation application volume in mm.
r	Rainfall rate in $mm h^{-1}$.
RA	Mean daily solar radiation in $MJ m^{-2} d^{-1}$.
RAD	Daily mean solar radiation on dry days in $MJ m^{-2} d^{-1}$.
RAMX	Maximum daily solar radiation in $MJ m^{-2} d^{-1}$.
RAW	Daily mean solar radiation on wet days in $MJ m^{-2} d^{-1}$.
RBO	Net outgoing long wave radiation in $MJ m^{-2} d^{-1}$.
RCHL	Routing reach channel length in km.
RD	Root depth in m.

RDMX	Maximum root depth for a crop in m.
RE	Rainfall energy for water erosion equations.
rep	Peak rainfall excess rate in mm h^{-1} .
RFI	Intercepted rainfall in mm.
RFPK	Groundwater flow partitioning coefficient.
RFPL	Reach floodplain length in m.
RFPS	Reach floodplain slope in m m^{-1} .
RFRA	Rainfall on the reservoir in m^{-3} .
RFTT	Groundwater storage residence time in d.
RFV	Rainfall that arrives on the soil surface in mm
RFV _{.5}	Maximum storm rainfall in mm occurring in 0.5 h.
RFV _{.5a}	Mean maximum 0.5-h rainfall amount in mm for a month.
RFV _{.5u}	Maximum 0.5-h rainfall amount in mm for frequency F.
RFV ₂₄	24-h duration rainfall volume in mm.
RFVTC	Maximum rainfall volume during the watershed's time of concentration in mm.
RGF	Minimum root growth stress factor.
RH	Monthly long-term average relative humidity.
RHD	Daily mean relative humidity on dry days.
RHG	Generated relative humidity.
RHG'	Generated relative humidity adjusted to the mean of the triangular distribution.
RHL	Lower limit for generated relative humidity for the day.
RHP	Peak of the triangular relative humidity distribution (RHW or RHD).
RHT	Input ridge height for a tillage operation in m.
RHTT	Ridge height in mm.
RHU	Upper limit for generated relative humidity for a day.

RHW	Daily mean relative humidity on wet days.
RIF	Wind erosion ridge roughness factor.
RIMX	Maximum possible intercepted rainfall for an event in mm.
RINT	Ridge interval in m.
RLA	Lime required to neutralize Al in $t\ ha^{-1}$.
RMP	Mineralization rate of fresh organic P in $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$.
RN	Net radiation in $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.
rnd	Uniform random number (0.0-1.0)
RNIT	Nitrification rate in $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$.
RNV	Combined nitrification and volatilization $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$.
ROK	Coarse fragment content of a soil layer in %.
ROKF	Coarse fragment factor in soil erosion equations.
rp	Peak rainfall rate in $mm\ h^{-1}$.
RR	Flow rate through the principal spillway in $m^3\ d^{-1}$.
RRF	Clod roughness factor.
RRUF	Soil surface random roughness in mm.
RSD	Flat crop residue in $t\ ha^{-1}$.
RSDM	Manure on the soil surface in $t\ ha^{-1}$.
RSFN	Groundwater return flow N rate in $kg\ d^{-1}$.
RSHC	Hydraulic conductivity of the reservoir bottom in $mm\ h^{-1}$.
RSO _N	Organic N content of a reservoir in kg.
RSO _{N0}	Organic N content of a reservoir in kg at the start of a day.
RSSA	Reservoir surface area in ha.
RSSF	Groundwater return flow rate in $mm\ d^{-1}$.
RSSN	Soluble N content in a reservoir in kg.
RSSN ₀	Soluble N content in a reservoir at the start of a day in kg.

RSV	Reservoir water content in m^3 .
RSV ₀	Reservoir water content at the start of the day in m^3 .
RSVE	Reservoir storage volume in m^3 at the emergency spillway elevation.
RSVP	Reservoir storage volume in m^3 at the principal spillway elevation.
RSY	Reservoir sediment content in t.
RSY ₀	Reservoir sediment content in t at the start of the day.
RTP	The rainfall volume at t_p in mm.
RUE	Radiation use efficiency factor for converting energy to biomass in $(\text{kg ha}^{-1})/(\text{MJ m}^{-2})$.
RVOL	Volatilization rate in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
RW	Total root weight in t ha^{-1} .
RW ₀	Total root weight in t ha^{-1} at the beginning of a day.
RWT	Root weight by soil layer in t ha^{-1} .
RZ	Minimum of soil profile depth and RDMX in m.
RZLN	Root zone N leaching rate in kg d^{-1} .
s	SCS runoff retention parameter.
s'	SCS runoff retention parameter adjusted for frozen soil.
s ₁	SCS runoff retention parameter associated with CN ₁ .
s ₂	SCS runoff retention parameter associated with CN ₂ .
s ₃	SCS runoff retention parameter associated with CN ₃ .
SALB	Soil albedo.
SAN	Sand content of the soil in %.
SAT	Soil saturation factor.
SATK	Soil saturated conductivity in mm h^{-1} .
SC	Saturated conductivity of a soil layer in mm h^{-1} .
SD	Sun's declination angle in radians.

SDRA	Standard deviation of daily solar radiation in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.
SEP	Reservoir seepage loss in m^3 .
SEV	Potential soil evaporation for a soil layer in mm.
SEV'	Adjusted soil water evaporation in mm based on limited soil water content.
Sf	Fraction of mineral N sorbed to litter: 0.05 for surface litter, 0.1 for belowground litter.
SFL	TR-55 shallow flow length in km.
SFV	Average shallow flow velocity in km h^{-1} .
SIA	Reach storage plus the inflow volume in m during DTHY.
SIL	Silt content of the soil in %.
SL	USLE slope length and steepness factor.
SMB	Sum of the bases in cmol kg^{-1} .
SML	Snowmelt rate in mm d^{-1} .
SMLA	Leaf-area-index of the plant stand.
SMX ₀	Sum of the material in TLD before mixing in kg ha^{-1} .
SN	N stress factor for a crop.
SNO	Snow present in mm of water.
SNOF	Snow cover factor used in soil temperature equations.
SNPKT	Snow pack temperature in $^{\circ}\text{C}$.
SNS	Scaling factor for N stress.
SP	P stress factor for a crop.
SPLG	Upland slope length in m.
SPN	Total soil profile N supply in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
SPP	Total soil profile supply of P in $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$.
SS	Root growth soil strength stress factor.
SSF	Subsurface flow rate in mm d^{-1} .

ST	Soil water content in the root zone in mm.
ST ₁	Water content minus field capacity of the top 1 meter of soil in mm.
ST ₂₅	Water content at WP+0.25(FC-WP) in mm.
STD	Standing crop residue in t ha ⁻¹ .
STD ₀	Standing crop residue before tillage in t ha ⁻¹ .
STDL	Weight of lignin in STD in kg ha ⁻¹ .
STDN	Weight of N in STD in kg ha ⁻¹ .
STDNE	Standing dead N after enrichment with sorbed N in a soil layer in kg ha ⁻¹ .
STH	Watershed storage volume in mm at the end of the time interval in h.
STH ₀	Watershed storage volume in mm at the start of the time interval in h.
STL	Standing live biomass of the crop in t ha ⁻¹ .
STL'	Standing live biomass at the end of the day in t ha ⁻¹ .
STMP	Soil layer temperature in °C.
STMP ₀	Soil layer temperature for previous day in °C.
STP	Average slope of the watershed in m m ⁻¹ .
STS	Root growth temperature stress for a crop.
SWF	Nutrient cycling soil water factor.
SWH	Accumulated plant water use in mm between HUI values of 0.5 and 1.0.
SWLT	Water stored in the litter in mm.
SZ	Scaling factor in soil settling equation.
T ₁	Water tension in soil layer 1 in kPa.
T ₂	Water tension in soil layer 2 in kPa.
TAGP	Above ground plant material in t ha ⁻¹ .
TBP	Tillage factor for biological processes.
TBSC	Crop-specific base temperature in oC.

TC	Watershed time of concentration in h.
TC _C	Time of concentration for channel flow in h.
TCS	Time of concentration for surface flow in h.
TCSF	Time of concentration for shallow channel flow in h.
TDMX	Daily mean maximum temperature for dry days in °C.
TDP	Time required for reservoir to return to normal concentration in d.
TDST	Deviate drawn from a triangular distribution.
TFN	Nutrient cycling temperature factor.
THW	Wind direction clockwise from north in radians.
TK	Mean daily air temperature in °K.
TLAI	Leaf area index of mixed plant stand.
TLD	Tillage depth in m.
TMN	Daily minimum air temperature in °C.
TMX	Daily maximum air temperature in °C.
TNO ₃	NO ₃ -N content in the soil root zone in kg ha ⁻¹ .
TOPC	Optimal temperature for a crop in °C.
t _p	Time to peak of the storm in h.
t _{pu}	Time to peak of the dimensionless rainfall distribution.
TRT	Reach floodplain travel time in h.
TS	Plant temperature stress factor.
TSNO	Age of the snow pack in d.
TT	Travel time through a soil layer in h.
TT _H	Horizontal travel time through a soil layer in h.
TT _R	Travel time through a routing reach in h.

TT _v	Vertical travel time through a soil layer in h.
TW	Water surface width at depth DH in m.
TW ₂	Water surface width in m at depth D ₂ .
TW ₃	Water surface width in m at depth D ₃ .
TWMX	Daily mean maximum temperature for wet days in °C.
TX	Mean daily air temperature in °C.
u'	Threshold friction velocity in m s ⁻¹ .
u ₁₀	Wind speed at f fraction of the day in m s ⁻¹ .
U ₁₀	Mean daily wind speed at 10 m height in m s ⁻¹ .
UC	Soil layer plant water use compensation factor.
UF	Upward flow rate in a soil layer in mm d ⁻¹ .
UN	Rate of N supplied by the soil in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
UN'	The actual plant N uptake rate in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
UN ₁	Actual N content of the crop in kg ha ⁻¹ .
UNM	Crop N uptake rate in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
UNO	Optimal N content for the crop in kg ha ⁻¹ .
UP	Rate of P supplied by the soil in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
UP'	Actual plant P uptake rate from a soil layer in kg ha ⁻¹ d ⁻¹ .
UP ₁	Actual P content of the crop in kg ha ⁻¹ .
USTR	Friction velocity in m s ⁻¹ .
USTRT	Threshold friction velocity in m s ⁻¹ .
UW	Plant water use rate in a soil layer in mm d ⁻¹ .
UX	Potential water use rate in mm d ⁻¹ .
UZZ	Daily mean wind speed adjusted for the crop height in m s ⁻¹ .
V	Flow velocity in m s ⁻¹ .

VCH	Channel flow velocity in m s^{-1} .
VFP	Floodplain flow velocity in m s^{-1} .
VGF	Wind erosion vegetative cover equivalent factor.
VPD	Vapor pressure deficit in kPa.
VPTH	Threshold vapor pressure for the crop kPa.
VX	Furrow irrigation flow velocity in m s^{-1} .
w1	Parameter in CN-soil water relationship.
w2	Parameter in CN-soil water relationship.
WAVP	Crop parameter relating RUE and VPD.
WDRM	Minimum day length for the location plus 1.0 in h.
WFX	Calculated N fixation rate considering growth stage, soil water content, and soil N content in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
WFX'	Final adjusted N fixation rate in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
WIP	P immobilization rate in $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
WL	Unsheltered field length along the prevailing wind direction in km.
wn1	Descent angle of saltating sand grains in degrees.
wn2	Angle of the wind relative to ridges in radians
wn3	Wind erosion distance of run parameter.
wn4	Wind erosion rate parameter.
WNF	Nitrification-volatilization wind speed factor.
WNH3	Weight of NH_3 in a soil layer in kg ha^{-1} .
WNO3	$\text{NO}_3\text{-N}$ content in a soil layer in kg ha^{-1} .
WNO3'	$\text{NO}_3\text{-N}$ content at the end of a day in kg ha^{-1} .
WO	Amount of pesticide washed off the plants by a rainstorm in g ha^{-1} .
WOC	Organic carbon content of the soil in %.
WOF	Washoff fraction for the particular pesticide.

WP	Wilting point soil water content (1500 kPa for many soils) in mm.
WPMA	Soil layer active mineral P content in kg ha ⁻¹ .
WPML	Soil layer labile P content in kg ha ⁻¹ .
WPMS	Soil layer stable mineral P content in kg ha ⁻¹ .
WPO	Soil layer organic P content in kg ha ⁻¹ .
WS	Water stress factor for a crop.
WSA	Watershed area in ha.
WSYF	Minimum harvest index for a crop.
WTBL	Depth in m from the soil surface to the water table.
WTMN	Minimum annual water table depth in m.
WTMX	Maximum annual water table depth in m.
X	Amount of the material in a soil layer after mixing in kg ha ⁻¹ .
X ₀	Amount of the material in a soil layer before mixing kg ha ⁻¹ .
X _{BMT}	Microbial biomass transformation control by soil texture and structure. Its values: surface litter layer = 1; all other layers = $1 - 0.0075 \times (\text{SIL} + \text{CLA})$
XCS	Minimum x coordinate of the subarea centroids in km.
XCT	x coordinates of the subarea centroids in km
XCU	Maximum x coordinate of the subarea centroids in km.
XKP ₁	Exponential parameter in simulated rainfall distribution in h.
XKP ₂	Exponential parameter in simulated rainfall distribution in h.
XLAI	Maximum leaf area index for a crop.
X _{LSLF}	Control on potential transformation of structural litter by lignin fraction of structural litter.
XSL	x scale of the box around the watershed for generating spatially distributed rainfall.
Y	Sediment yield in t ha ⁻¹ .
YCS	Minimum y coordinate of the subarea centroids in km.
YCT	y coordinates of the subarea centroids in km.

YCU	Maximum y coordinate of the subarea centroids in km.
YI	Sediment inflow in $t\ ha^{-1}$.
YLAT	Latitude of the site in degrees.
YLD	Amount of the crop removed from the field in $t\ ha^{-1}$.
YMNU	Manure erosion in $t\ ha^{-1}$.
YNO	Organic nutrient (N or P) outflow in $kg\ ha^{-1}$.
YO	Sediment outflow in $t\ ha^{-1}$.
YON	Organic N runoff loss in $kg\ ha^{-1}$.
YON _I	Organic N reservoir inflow rate in $kg\ d^{-1}$.
YON _O	Organic N reservoir outflow rate in $kg\ d^{-1}$.
YP	Sediment phase P lost in runoff in $kg\ ha^{-1}$.
YSL	y scale of the box around the watershed for generating spatially distributed rainfall in km.
YSP	Soluble P in $kg\ ha^{-1}$ lost in runoff.
YU	Potential change in sediment yield in $t\ ha^{-1}$ within a routing reach.
YW	Wind erosion in $kg\ m^{-1}$.
YWR	Integral of the wind erosion rate over the duration of wind greater than threshold velocity.
YWR'	Wind erosion rate in $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$.
Z	Soil depth in m.
Z0	Surface roughness parameter in m.
Z5	Depth to the center of a soil layer in mm.
ZCH	Channel depth in m.
ZD	Displacement height of the crop in m.
ZFP	Floodplain flow depth in m.
ZTP	Subarea rainfall weighting factor accounts for rainfall duration, distance between subarea centroid, and storm center and rainfall gradient.

APPENDIX B:

APEX PUBLICATION

Benson, Verel W., D. Todd Rarrand, Robert E. Young III and Peter Zimmell. Estimated Nutrient Movement with Alternative Poultry Litter Application rates on various soils, using different management systems. 2000.

Chen, X., W. L. Harman, M. Magre, E. Wang, R. Srinivasan, J. R. Williams. 2000. "Water quality assessment with agro-environmental indexing of non-point sources, Trinity River Basin." *Applied Engineering in Agriculture* 16(4):405-417.

Flowers, Joan D., Jimmy R. Williams, and Larry M. Hauck. 1996. "NPP: Calibration of the APEX Model for Dairy Waste Application Fields." A report from the Livestock and the Environment: National Pilot Project, Texas Institute for Applied Environmental Research, Tarleton State University, Stephenville, TX.

Fox, Garey A. 1998. "Investigation of High Plains Management Practices with the APEX Modeling System." *Texas A&M Undergraduate Journal of Science*, Vol. 2 (1):9-16, Spring issue.

Gassman, P. 1997. "NPP integrated modeling system. Environmental baseline assumptions and results for the APEX model." Staff Report 97-SR 85. Ames, Iowa: Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.

Gassman, Philip W., Ali Saleh, Edward Osei, Joju Abraham, and John Rodecap. 2003. "Environmental and economic impacts of alternative management systems for the mineral creek watershed." In *Proceedings of the Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations II*, 8 – 12 November, Albuquerque, NM, Amer. Soc. Agri. Engineers, pp. 323-331.

Gassman, Philip W., Edward Osei, Ali Saleh, and Larry M. Hauck. 2002. "Application of an Environmental and Economic Modeling System for Watershed Assessments." *J. of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 423-438, April.

Harman, W. L., J. R. Williams, M. Magre, and E. Wang. 2003. "Reducing nutrient losses from CAFOs: A simulation analysis of feedlot management options and filter strip characteristics." Presented at the International Conference on Agriculture and Science Technology, Houston, Texas, Oct. 12 – 15.

Harman, W.L. J.R. Williams, M. Magre, and E. Wang. 2004. Enviro-friendly cattle feedlots: Reducing nutrient losses with the APEX-feedlot model. Submitted to J. Environ. Qual.

Harman, Wyatte L., E. Wang, and J. R. Williams. 2002. "Herbicide remediation to protect water quality: Simulation results of APEX." Presented at the International Conference on Environmentally Sustainable Agriculture for Dry Areas for the 3rd Millennium, Shijiazhuang, Hebei, Peoples Republic of China, Sept. 15-19.

Harman, Wyatte L., E. Wang, and J. R. Williams. 2004. "Reducing Atrazine losses: water quality implications of alternative runoff control practices." J. Environmental Quality 33:7-12.

Harman, Wyatte L., Ranjan Muttiah, J. R. Williams, and Melanie Magre. 1998. Sedimentation of Lake Meredith: An Investigation of Water and Wind Deposition. BRC Report No. 01-25, Texas A & M University, Blackland Research Center, Temple.

Izaurrealde, R. C., J. R. Williams, W. B. McGill, and N. J. Rosenberg. 2001. "Simulating Soil Carbon Dynamics, Erosion, and Tillage with EPIC." Paper presented at the First National Conference on Carbon Sequestration, Washington DC, May 14 – 17.

Osei, E., P. W. Gassman, L. M. Hauck, R. Jones, L. Beran, P. T. Dyke, D. W. Goss, J. D. Flowers, A.M.S. McFarland, and A. Saleh. 2002. "Environmental benefits and economic costs of manure incorporation on dairy waste application fields." J. Environmental Management 68:1-11.

Pratt, Staci, Ron Jones, and Charles Allan Jones. 1997. "Livestock and the Environment. Expanding the Focus: Policy Options - CEEOT-LP." Final Report, Contract No. CR 820374-02, prepared for the U.S. EPA. Texas Institute for Applied Environmental Research, Tarleton State University, Stephenville, Texas.

Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Dugas, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarland. 1997. "Using

Apex to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management." Presented at the ASAE International Meeting, Minneapolis, MN, August 10-14.

Ramanarayanan, Tharacad S., M. V. Padmanabhan, G. N. Gajanan, Jimmy Williams. 1998. "Comparison of simulated and observed runoff and soil loss on three small United States watersheds." NATO ASI Series 1(55):76-88.

Rosenthal, Wesley, Wyatt L. Harman, Erda Wang, and Benjamin Sheng. 2001. Arroyo Colorado River Nutrient Losses: An Investigation of Residue Management Through Conservation Tillage to Reduce Nutrient Losses. BRC Report No. 01-32. Texas A & M University, Blackland Research Center, Temple.

Rosenthal, Wesley, Wyatt L. Harman, J. R. Williams, and Melanie Magre. 1999. White River Lake Sedimentation: An Investigation of Range and Cropland Management Practices to Reduce Erosion. BRC Report NO. 01-26, Texas A & M University, Blackland Research Center, Temple.

Rosenthal, Wesley, Wyatt L. Harman, J. R. Williams, and Melanie Magre. 2000a. Lower Leon River Sedimentation: An Investigation of Range and Cropland Management Practices to Reduce Erosion. BRC Report No. 01-28, Texas A & M University, Blackland Research Center, Temple.

Rosenthal, Wesley, Wyatt L. Harman, J. R. Williams, and Melanie Magre. 2000b. Upper Leon River Sedimentation: An Investigation of Range and Cropland Management Practices to Reduce Erosion. BRC Report No. 01-29, Texas A & M University, Blackland Research Center, Temple.

Sanabria, Joaquin, Jay D Atwood, Paul T. Dyke, Jimmy R. Williams, and Andrew. P. Manale. 2000. "Precipitation Extreme Events and Land Management Practices for Flood Mitigation." In Proceedings of American Water Resources Association Conference on Water Resources in Extreme Environments, Editor Douglas L. Kane. May 1 – 3. Anchorage, AK.

Wang, E., W. L. Harman, J. R. Williams, and J. M. Sweeten. 2002. "Profitability and nutrient losses of alternative manure application strategies with conservation tillage." J. Soil and Water Conservation 57(4):221-228.

Williams, J. R.. APEX Development. Abstract. May 17, 1995.

Williams, J. R.. C. A. Jones, P. W. Gassman and L. M. Hauck. Simulation of Animal Waste Management with APEX. ABSTRACT.

Williams, J. R., J. G. Arnold, and R. Srinivasan. 2000. The APEX Model. BRC Report No. 00-06, Texas A&M Blackland Research and Extension Center, Temple.

Williams, J. R., J. G. Arnold, R. Srinivasan, and T. S. Ramanarayanan. 1998. "33. APEX: A New Tool for Predicting the Effects of Climate and CO₂ Changes on Erosion and Water Quality." In: NATO ASI Series, Vol. I 55, Modelling Soil Erosion by Water, Edited by John Boardman and David Favis-Mortlock. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

APPENDIX C:

REFERENCES

Abruna, F., J. Rodriguez, and S. Silva. 1982. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico. VI. Grain sorghum. *J. Agric. Univ. P.R.* 61:28-38.

Acevedo, E., T.C. Hsiao, and D.W. Henderson. 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiol.* 48:631-636.

Adams, W.A., 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *J. Soil Sci.* 24, 10-17.

Albrecht, S.L., S.M. Bennett, and K.J. Boote. 1984. Relationship of nitrogenase activity to plant water stress in field-grown soybeans. *Field Crops Res.* 8:61-71.

Andrews, R.E. and E.I. Newman. 1970. Root density and competition for nutrients. *Oecol. Plant.* 5:319-334.

Arnold, J.G., J. D. Atwood, V. W. Benson, R. Srinivasan, and J. R. Williams. 1998. Potential Environmental and Economic Impacts of Implementing National Conservation Buffer Initiative Sedimentation Control Measures. USDA, NRCS Staff paper.

Bagnold, R.A., 1977. Bed-load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13(2): 303-312.

Baier W., Robertson, Geo. W., 1965. Estimation of Latent Evaporation from Simple Weather Observations. *Can. J. Plant Sci.* Vol. 45 Pp. 276-284.

Begg, J.E., J.F. Bierhuizen, E.R. Lemon, D.K. Misra, R.O. Slatyer, and W.R. Stern. 1964. Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet in an area of high solar radiation. *Agric. Meteorol.* 1:294-312.

Bonhomme, R., F. Ruget, M. Derieux, and P. Vincourt. 1982. Relations entre production de matiere seche aerienne et energie interceptee chez differents genotypes de mais. *C.R. Adad. Sci. Paris* 294:393-398.

Borg, H. and D.V. Grimes. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans.*

ASAE 29:194-197.

Bouinols, A., M. Cabelguenne, C.A. Jones, A. Chalamet, J.L. Charpentreau, and J.R. Marty. 1991. Simulation of soybean nitrogen nutrition for a silty clay soil in southern France. *Field Crops Res.* 26:19-34.

Brenes, E. and R.W. Pearson. 1973. Root responses of three Gramineae species to soil acidity in an Oxisol and an Ultisol. *Soil Sci.* 116:295-302.

Chepil, W.S. 1956. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20:288-292.

Cole, G.W., L. Lyles, and L.J. Hagen. 1982. A simulation model of daily wind erosion soil loss. 1982 ASAE Winter Meeting, Paper No. 82-2575.

DeJager, A. 1979. Localized stimulation of root growth and phosphate uptake in *Zea mays* L. resulting from restricted phosphate supply. pp. 391-403 In J.L. Harley and R. S. Russell (eds.) *The Soil-Root Interface*. Academic Press, New York.

Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper 33*. Food Agric. Org. United Nations, Rome.

Eavis, B.W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil* 36:613-622.

Eik, K. and J.J. Hanway. 1965. Some factors affecting development and longevity of leaves of corn. *Agron. J.* 57:7-12.

Flowers, J. D., J. R. Williams, L. M. Hauck, 1996. *Livestock and the Environment: A National Pilot Project NPP Integrated Modeling system: Calibration of the APEX Model for Dairy Waste Application Fields in Erath County, Texas*. TIAER pr 96-07.

Foy, C.D., H.N. Lafever, J.W. Scuartz, and A.L. Fleming. 1974. Aluminum tolerance of wheat cultivars related to region of origin. *Agron. J.* 66:751-758.

Godwin, D.C., C.A. Jones, J.T. Ritchie, P.L.G. Vlek, and L.G. Youngdahl. 1984. The water and nitrogen components of the CERES models. pp. 95-100 In *Proc. Intl. Symp. on Minimum*

Data Sets for Agrotechnology Transfer, March 1983, Patancheru, India. Intl. Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

Green, W. H. and G. A. Ampt. 1911. Studies on Soil Physics: 1. Flow of Air and Water Through Soils. *Journal Agricultural Science* 4:1-24.

Grossman, R.B., V.D. Nettleton, and B.R. Brasher. 1985. Application of pedology to plant response prediction for tropical vertisols. In Proc. Fifth Intl. Soil Classification Workshop, Sudan, November 1982.

Hagen, L.J., E. L. Skidmore, and J.B. Layton. 1988. Wind erosion abrasion: Effects of aggregate moisture. *Trans. ASAE* 31:725-728.

Hanks, R.J. 1983. Yield and water-use relationships: An overview. pp. 393-411 In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair, eds., *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engr. Agric.* 1:96-99.

Harper, J.E. 1976. Contribution of dinitrogen and soil or fertilizer nitrogen to soybean production. pp. 101-107 In L.D. Hill (ed.) *Proc. World Soybean Research Conf.*

Hazen, Allen. 1930. *Flood Flows, A Study of Frequencies and Magnitudes*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Hershfield, D.M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. U.S. Dept. Commerce Tech. Paper No. 40.

Izaurrealde, R.C., J.R. Williams, W.B. McGill, N.J. Rosenberg, and M.C. Quiroga Jakas. 2004. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. Submitted to *Ecol. Modell.*

Jarvis, S.C. and A.D. Robson. 1983. The effect of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in western Australian soils. I. Effects with subterranean clover grown under leaching conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 34:341-353.

Jones, C.A. 1983a. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize

and grain sorghum. *Field Crops Res.* 6:133-147.

Jones, C.A. 1983b. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:1208-1211.

Jones, C.A. 1984. Estimation of percent aluminum saturation from soil chemical data. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15:327-335.

Jones, C.A. 1985. *C-4 Grasses and Cereals*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Jones, C.A., C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(4):800-805.

Jungk, A. and S.A. Barber. 1974. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. *Agron. J.* 66:554-557.

Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:252-254.

Kiniry, J.R., J.R. Williams, P.W. Gassman, and P. Debaeke. 1992. A general, process-Oriented model for two competing plant species. *Trans ASAE*. Vol.35(3):801-810.

Kletke, D.D. 1979. Operation of the enterprise budget generator. Oklahoma State Univ., Agric. Exp. Sta. Res. Rept. P-790.

Knisel, W.G. 1980. CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.

Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30(5):1403-1428.

McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, and others. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. *Environ. Prot. Tech. Serv., EPA* 600/2-76-151.

McGrann, J.M., K.D. Olson, T.A. Powell, and T.R. Nelson. 1986. Microcomputer budget management system user manual. Dept. Agric. Econ., Texas A&M Univ., College Station.

Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. pp. 486-492 In W.G. Knisel, ed.,

CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19:205-234.

Monteith, J.L. 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London.

Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B.* 281:277-329.

Monteith, N.H. and C.L. Banath. 1965. The effect of soil strength on sugarcane growth. *Trop. Agric.* 42:293-296.

Muchow, R.C., D.B. Coates, G.L. Wilson, and M.A. Foale. 1982. Growth and productivity of irrigated *Sorghum bicolor* (L. Moench) in Northern Australia. I. Plant density and arrangement effects on light interception and distribution, and grain yield, in the hybrid Texas 610SR in low and medium latitudes. *Aust. J. Agric. Res.* 33:773-784.

Mugwira, L.M., S.J. Patel, and A.L. Fleming. 1980. Aluminum effects on growth and Al, Ca, Mg, K, and P levels in triticale, wheat, and rye. *Plant Soil* 57:467-470.

Nicks, A.D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. pp. 154-171 In *Proc. Symp. Statistical Hydrology*, Aug.-Sept. 1971, Tucson, AZ. U.S. Dept. Agric., Misc. Publ. No. 1275.

Nicks, A.D., L.J. Lane. 1989. Chapter 2. Weather Generator. Pp. 2.1-2.19. Profile Model Documentation. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Version. NSERL Report No. 2, USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab., West Lafayette, Indiana 47907.

Nyatsanga, T. and W.H. Pierre. 1973. Effect of nitrogen fixation by legumes on soil acidity. *Agron. J.* 65:936-940.

Onstad, C.A. and G.R. Foster. 1975. Erosion modeling on a watershed. *Trans. ASAE* 18(2):288-292.

Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. and Ojima, D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1173-1179.

Parton, W.J., Scurlock, J.M.O., Ojima, D.S., Gilmanov, T.G., Scholes, R.J., Schimel, D.S., Kirchner, T.,

Menaut, J-C, Seastedt, T., Garcia Moya, E., Kamnalrut, A. and Kinyamario, J.I., 1993. Observations and modelling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 785-809.

Parton, W.J., Ojima, D.S., Cole, C.V. and Schimel, D.S., 1994. A general model for soil organic matter dynamics: Sensitivity to litter chemistry, texture and management. In: *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*, SSSA Spec. Public. No. 39, Madison, WI, pp. 147-167.

Patterson, T.G. and T.A. Larue. 1983. Nitrogen fixation (C_2H_2) by soybeans: Cultivars and seasonal effects and comparison of estimates. *Crop. Sci.* 23:488-492.

Pavan, M.A., F.T. Bingham, and P.F. Pratt. 1982. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$, and $CaSO_4/2H_2O$. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1201-1207.

Peech, M. 1965. Lime requirement. *Agronomy* 9:927-932.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open, bare soil and grass. *Proc. Soc. London Ser. A*193:120-145.

Pesek, J., G. Stanford, and N.L. Case. 1971. Nitrogen production and use. pp. 217-269 In R.A. Olson, ed., *Fertilizer Technology and Use*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Pierre, W.H., J.R. Webb, and W.D. Shrader. 1971. Quantitative effects of nitrogen fertilizer on the development and downward movement of soil acidity in relation to level of fertilization and crop removal in a continuous corn cropping system. *Agron. J.* 63:291-297.

Potter, K.N. and T.M. Zobeck. 1990. Estimation of soil microrelief. *Trans. ASAE* 33(1):156-161.

Potter, K.N., T.M. Zobeck, and L.J. Hagen. 1990. A microrelief index to estimate soil erodibility by wind. *Trans. ASAE* 33(1):151-155.

Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-92.

Putman, J., J. Williams, and D. Sawyer. 1988. Using the erosion productivity calculator(EPIC) model to estimate the impact of soil erosion for the 1985 RCA appraisal. *J. Soil Water Conserv.* 43(4):321-326.

Reddy, K.R., R. Khaleel, M.R. Overcash, and P.W. Westerman. 1979. A nonpoint source model for land

areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Trans. ASAE* 22(6):1398-1404.

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U. S. Dept. Agric., Agric. Res. Ser., Agriculture Handbook Number 703

Richardson, C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17(1):182-190.

Richardson, C.W. 1982. Dependence structure of daily temperature and solar radiation. *Trans. ASAE* 25(3):735-739.

Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. U.S. Dept. Agric., Agric. Res. Ser., ARS-8.

Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Res.* 8:1204-1213.

Seligman, N.G. and H. van Keulen. 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. pp. 192-221 In M.J. Frissel and J.A. van Veen, eds., *Simulation of Nitrogen Behaviour of Soil-Plant Systems*, Proc. Workshop, Wageningen, Jan.-Feb. 1980.

Sharpley, A.N., C.A. Jones, and J.R. Williams. 1990. The nutrient component of EPIC. Chapter 7, pp. 152-166 In A.N. Sharpley and J.R. Williams (eds.) *EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. U.S. Dept. Agric. Tech. Bull. No. 1768.

Sharpley, A.N., C.A. Jones, C. Gray, and C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: II. Prediction of labile, organic, and sorbed phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:800-805.

Sharpley, A.N., C.A. Jones, C. Gray, and others. 1985. A detailed phosphorus characterization of seventy-eight soils. U.S. Dept. Agric., Agric. Res. Ser., ARS-31.

Sharpley, A.N. and J.R. Williams, eds. 1990. *EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. U.S. Dept. Agric. Tech. Bull. No. 1768.

Simanton, J.R., E. Rawitz, and E.D. Shirley. 1984. Effects of rock fragments on erosion of semiarid rangeland soils. Chapter 7, pp. 65-72 In *Erosion and Productivity of Soils Containing Rock Fragments*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Skidmore, E.L. 1986. Wind-erosion climatic erosivity. *Climate Change* 9:195-208.

Soil Survey Staff. 1982. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. U.S. Dept. Agric., Soil Conserv. Ser., Soil Survey Investigations Rept. No. 1 (revised August 1982). Washington, DC.

Stockle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg, and C.A. Jones. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I- Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agric. Systems* 38:225-238.

Stout, J.E. 1990. Wind erosion with a simple field. *Trans. ASAE* 33:1597-1600.

Taylor, H.M. 1983. A program to increase plant available water through rooting modification. pp. 463-472 In *Root Ecology and Its Practical Application*. Intl. Symp., Gumpenstein, September 1982. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, A-8952 Irding.

Taylor, H.M., G.M. Robertson, and J.J. Parker, Jr. 1966. Soil strength--root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.* 102:18-22.

Tollenaar, M., T.B. Daynard, and R.B. Hunter. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date of maize. *Crop Sci.* 19:363-366.

Thornley, J.H.M. 1976. *Mathematical Models in Plant Physiology*. Academic Press, New York.

Uchijima, Z., T. Udagawa, T. Horie, and K. Kobayashi. 1968. The penetration of direct solar radiation into corn canopy and the intensity of direct radiation on the foliage surface. *J. Agron. Meteorol. Tokyo* 3:141-151.

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook*, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Tech. Release 55.

U.S. Department of Commerce. 1968. *Climatic Atlas of the United States*. Environmental Science Services Administration, Environmental Data Service.

U.S. Department of Commerce. 1979. Maximum short duration rainfall. National Summary, Climatic Data.

Vitousek, P.M., Turner, D.R., Parton, W.J. and Sanford, R.L., 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 75, 418-429.

Watts, W.R. 1972. Leaf extension in *Zea mays*. II. Leaf extension in response to independent variation of the temperature of the apical meristem, of the air around the leaves, and of the rootzone. *J. Exp. Bot.* 23:713-721.

Williams, J.R. 1975a. HYMO flood routing, *J. Hydrology*, 26, 17-27.

Williams, J.R. 1975b. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. U.S. Dept. Agric., Agric. Res. Serv., ARS-S-40.

Williams, J.R. 1995. The EPIC Model. pp 909-1000 In V. P. Singh, Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.

Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.

Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. SWRRB, a simulator for water resources in rural basins. *ASCE Hydr. J.*, 111(6): 970-986.

Williams, J.R., J. G. Arnold, and R. Srinivasan. 2000. The APEX Model. Texas A&M Blackland Research Center Temple, BRC Report No. 00-06.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. U.S. Dept. Agric., Agric. Handbook No. 537.

Woodruff, N.P. and F.H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29(5):602-608.

농업 비점오염 평가를 위한 APEX 모델 설명서

번역자

김민경 National Academy of Agricultural Science, 126 Suin-ro, Suwon, Gyunggi-do, 441-707

최순균 National Academy of Agricultural Science, 126 Suin-ro, Suwon, Gyunggi-do, 441-707

정재학 Texas A&M AgriLife Research, 720 East Blackland Road, Temple, Texas 76502

원저자

J.R. Williams Texas A&M AgriLife Research, 720 East Blackland Road, Temple, Texas 76502

R.C. Izaurralde Texas A&M AgriLife Research, 720 East Blackland Road, Temple, Texas
76502

E.M. Steglich Natural Resources Conservation Service, 808 East Blackland Road, Temple,
Texas 76502