

BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEME - JEOLojİDE YENİ BİR YÖNTEM

COMPUTER - AIDED MODELLING - A NEW METHOD IN GEOLOGY

M. Namık YALÇIN

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul ve
TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Yer Bilimleri Bölümü, Gebze-Kocaeli

ÖZ: Jeolojik süreçlerin en belirgin özelliği, son derece yavaş gelişmeleridir. Jeolojik zaman boyutunun milyonlarca yıl mertebesinde olması gerçek zaman boyutunda deneysel çalışmaların yapılmasına olanak vermemektedir. Ayrıca, jeolojik sistemlerin son derece karmaşık bir yapıya sahip olmaları, süreçlerin ayrıntılarının ve özellikle birbirlerine olan etkilerinin henüz yeterince aydınlatılmamış oluşu, bu sistemlerin iç dinamiklerinin ortaya konması ve neden sonuç bağlantılarının anlaşılmasında sorunlara neden olmaktadır.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak doğal süreçlerin matematik modeller yardımıyla simülasyonu tüm bilim dallarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. 1960'lı yılların sonlarından itibaren de jeolojide ilk uygulamalar başlatılmış ve başlangıçta yaygın olarak probabilistik matematik modeller kullanılmıştır. Son 10-15 yıllık dönemde ise deterministik modelleme yöntemiyle bir çok jeolojik sürecin simülasyonu ve hatta bunların biraraya getirilmesiyle çökel havzaların gelişimlerinin modellenmesi olanaklı hale gelmiştir.

Jeolojik sistem ve/veya süreçlerin deterministik olarak modellenmesinde kullanılan yaklaşım ve gözetilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a) Sistem ve/veya sürecin tanımlanması.
 - Sistemin öğelerinin veya sistemi oluşturan süreçlerin saptanması
 - Sistemin uzay ve zamandaki sınırlarının belirlenmesi
 - Sistemin öğeleri veya süreçler arasındaki bağların ortaya konması
- b) Sistemin kavramsal bir modelinin kurulması
- c) Sistemin matematiksel bir modelinin oluşturulması
 - Sınır ve başlangıç koşullarının tanımlanması
 - Süreçleri tanımlayan matematiksel denklemlerin türetilmesi
 - Uygun çözüm algoritmalarının bulunması
 - Matematiksel çözümlerin duraylılığının testi
- d) Simülasyon ve modelleme sonuçlarının doğal sistemle karşılaştırılması
 - Hesaplanan ve ölçülen parametrelerin denleştirilmesi yoluyla kavramsal veya matematiksel modelin modifikasyonu
- e) Modelleme yoluyla sistemin davranışlarının incelenmesi ve sonuçların analizi
 - Duyarlılık analizlerinin yapılması
 - Sınır ve başlangıç koşullarının etkilerinin araştırılması
 - Zaman ve uzay boyutundaki değişimlerin belirlenmesi

Bu yöntemin yardımıyla çok sayıda jeolojik sürecin gerçekçi bir şekilde modellenmesi mümkün olmaktadır. Modellenen süreçler arasında, çökellerin birikmesi ve sıkışması, hidrostatik ve hidrodinamik basınç gelişimi, su ve diğer formasyon akışkanlarının hareketi, havzalarındaki sıcaklık evrimi, organik maddenin metamorfizması, petrol ve doğal gazın oluşumu ile aşınma, fay, şarriyaj, diyapir gibi yapısal unsurların gelişmesi bulunmaktadır.

Bu yeni yöntemin jeoloji bilimine önemli yenilikler getirdiği, geliştirilmesi ve giderek artan kullanımı sonucunda da bir çok konunun daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacağı kesindir. Bu yöntem sayesinde "jeolog" gerçek

zaman boyutunda deneyler yapma, çok parametrelili karmaşık jeolojik sistemleri mantıksal bir bütünlük içinde inceleme, olası jeolojik evrim hipotezlerini test etme ve en önemlisi jeolojide "sayısallaştırmayı" gerçekleştirme şansına kavuşmaktadır.

ABSTRACT: Typical characteristic of geological processes is their very slow progress. Dimension of geological times measured in million years do not allow experimental studies on a real time basis. Furthermore, the very complicated structure of geological systems, limited knowledge on the details of geological processes and their close interrelationships cause problems in assessing the internal dynamics of such systems and in understanding of various obtained results.

In accordance with the progress in computer-technology, in all scientific disciplines efforts for the simulation of natural processes with the help of mathematical models are initiated. First applications in geology were at the end of sixties and at that time mostly probabilistic mathematical models were utilized. With the help of deterministic methods, simulation of many geological processes and even modelling of sedimentary basin evolution have been carried out during the last 10-15 years. The approach and items which should be considered by deterministic modelling of geological processes and/or systems can be summarized as follows:

- a) Definition of the process and/or system
 - Definition of the system parameters or processes forming the systems.
 - Determination of systems boundaries in time and space
 - Assessment of relationships between system parameters or processes
- b) Construction of the conceptual model of the system.
- c) Construction of a mathematical model
 - Definition of initial and boundary conditions
 - Derivation of the mathematical equations describing the processes
 - Finding of suitable algorithms
 - Testing the stability of mathematical solutions
- d) Simulation and comparison of modelling results with the real system
 - Modification of the conceptual and/or mathematical model
- e) Investigation of the systems behavior and analysis of the results
 - Performance of sensitivity analysis
 - Evaluation of the effects of initial and boundary conditions
 - Definition of changes in time and space

Many geological process can be modelled in a realistic manner with the help of this method. Accumulation and compaction of sediments, hydrostatic and hydrodynamic pressure development, water flow or movement of other formation fluids, temperature history of basins, metamorphism of organic matter, generation of petroleum and gas, erosion, faulting, thrusting and formation of diapirs are among the processes which can be modelled.

It is obvious that this new method contributes to a better understanding of many aspects of geology. Geologists gain the opportunity to make experiments in real time, to investigate complex geologic systems in a logical manner, to test possible geological evolution scenarios and to realize quantification in geology.

GİRİŞ

Jeolojik sistemlerin en belirgin özelliği zaman boyutunun milyonlarca yıl mertebesinde olması ve sistemi oluşturan çok sayıda sürecin fiziksel ayrıntılarının ve özellikle birbirlerine olan etkilerinin henüz yeterince bilinmiyor oluşudur. Bu nedenle jeolojik sistemler, çoğunlukla lineer olmayan bağıntıların egemen olduğu son derece karmaşık ve dinamik bir süreçler topluluğu olarak tanımlanabilir.

Bununla beraber, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak doğal süreçlerin matematik modeller yardımıyla simülasyonu 1960'lı yılların sonlarından itibaren jeolojide de uygulanmaya başlamıştır (Bonham-

Carter ve Harbaugh, 1968; Harbaugh ve Bonham-Carter, 1970). Son on-beş yıllık dönemde ise deterministik modelleme yöntemiyle bir çok jeolojik sürecin simülasyonu ve hatta bunların birlikte kullanılmasıyla sedimentler havzalarının gelişimlerinin modellenmesi olanaklı hale gelmiştir (Welte ve Yükler, 1981; Ungerer, vd., 1984; Welte ve Yalçın, 1988; Yalçın ve Welte, 1988; Yalçın, 1991).

Bu makalede, önce jeolojik sistem ve/veya süreçlerin deterministik olarak modellenmesinde kullanılan yaklaşım ve gözetilmesi gereken hususlar özetlenecek, sonra da bazı süreçlerin modellenmesi ile ilgili örnekler sunulacaktır.

GENEL YAKLAŞIM

Herhangi bir sürecin veya çeşitli süreçlerden oluşan sistemlerin deterministik-dinamik olarak modellenmesinde izlenen genel yaklaşım aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- I- Sistem ve/veya sürecin tanımlanması
- II- Sistemin kavramsal bir modelinin kurulması
- III- Sistemin matematiksel bir modelinin oluşturulması
- IV- Modelleme
- V- Modelleme sonuçlarının gerçek sistemle karşılaştırılması
- VI- Gerektiği takdirde kavramsal ve/veya matematiksel modelin düzeltilmesi
- VII- Modelleme yardımıyla sistemin davranışlarının incelenmesi ve sonuçların analizi

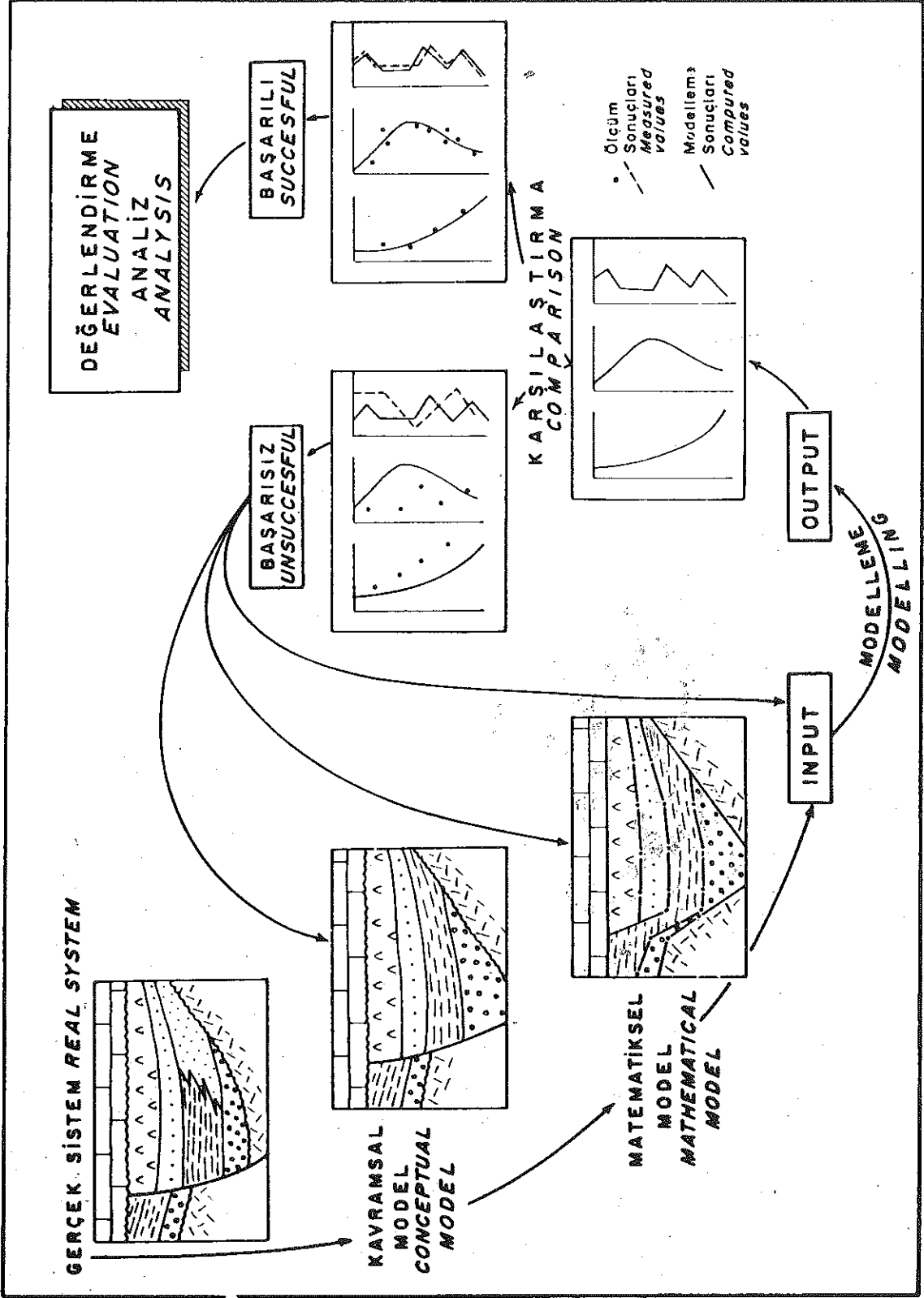
Sistemin tanımlanması yapılan gözlem, ölçüm ve derlenen verilerin değerlendirilmesine dayandırılır. Bu çerçevede modellenmek istenen gerçek sistemin unsurları, bunların arasındaki ilişkiler ve bu unsurların zamana bağlı değişimleri saptanır. Gerçek sistemin uzay ve zaman boyutlarındaki sınırlarının belirlenmesi de gereklidir. Daha sonra sağlanmış olan bilgilerin ışığında sistemi ve gelişimini tanımlayan bir kavramsal (düşünsel) model veya bir hipotez oluşturulur. Jeolojik sistemlerin karmaşıklığı ve zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesindeki güçlükler gözetildiğinde, oluşturulan kavramsal modelin gerçek sistemi eksiksiz olarak tanımlaması mümkün değildir. Bu yüzden daha sonraki aşamalarda kavramsal modelde değişikliklerin yapılması gerekebilir. Sistemin sınır ve başlangıç koşullarının tanımlanması, süreçleri tanımlayan matematiksel denklemlerin türetilmesi ve uygun çözüm algoritmalarının bulunmasıyla sistemin matematiksel bir modeli oluşturulur. Matematiksel model de gerçek sistemi yüzdeyüz bir doğrulukla temsil edemez. Bu çoğunlukla zaman ve uzay boyutunda sürekli olan gerçek sistemlerin matematiksel model oluşturma aşamasında diskretize edilmelerinden kaynaklanmaktadır. Matematiksel modelin ışığında modelleme için gerekli unsurları içeren girdi (input) verisinin hazırlanmasından sonra modelleme aşamasına gelinir. Modelleme çok sayıda mantıksal ve matematiksel işlem gerektirdiğinden bilgisayar desteği olmaksızın gerçekleştirilemez. Sistemin karmaşıklığı ile uzay ve zaman boyutundaki grid nokta sayısı ve kullanılan bilgisayarın gücüne bağlı olarak modelleme için değişik süreler gereksinim olmaktadır. Ancak doğada milyonlarca yıl süren olayların en çok birkaç saatlik bir sürede simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Model sonuçlarının elde edilmesiyle bunların gerçek sistemde yapılan ölçümler sonucu elde edilen verilerle karşılaştırılması aşamasına gelinir. Bu yolla kavramsal ve matematiksel modelin gerçeğe uygunluğu test edilir. Model sonuçları ile gözlem ve ölçümler arasındaki uyum tatmin edici olmadığı takdirde, geriye dönülerek kavramsal ve/veya matematiksel modelde gerekli düzeltmeler yapılır. Bu düzeltmelerin

ardından modelleme yinelenir ve bu işlem uyum tatmin edici bir düzeye gelinceye kadar iteratif olarak tekrarlanır. Düzeltme aşamasında jeolojik ve fiziksel kurallara özenle dikkat edilmesi ve bunları ihlâl edilmemesi gerekmektedir. Aksi halde uyum doğru ve gerçekçi olmayan senaryolarla sağlanmış olur. Çok sayıda parametre için uyum sağlandığında, modellemenin başarılı olduğuna karar verilir ve sistemin veya sürecin değişik koşullardaki davranışlarının incelenmesine başlanabilir. Bu aşamada, sınır ve başlangıç koşullarıyla bazı parametrelerin olası değerlerine yönelik duyarlık analizleri gerçekleştirilir ve modellemenin sağladığı en önemli avantaj kullanılarak sistemin zaman boyutundaki değişimleri saptanır (Şekil-1).

UYGULAMA

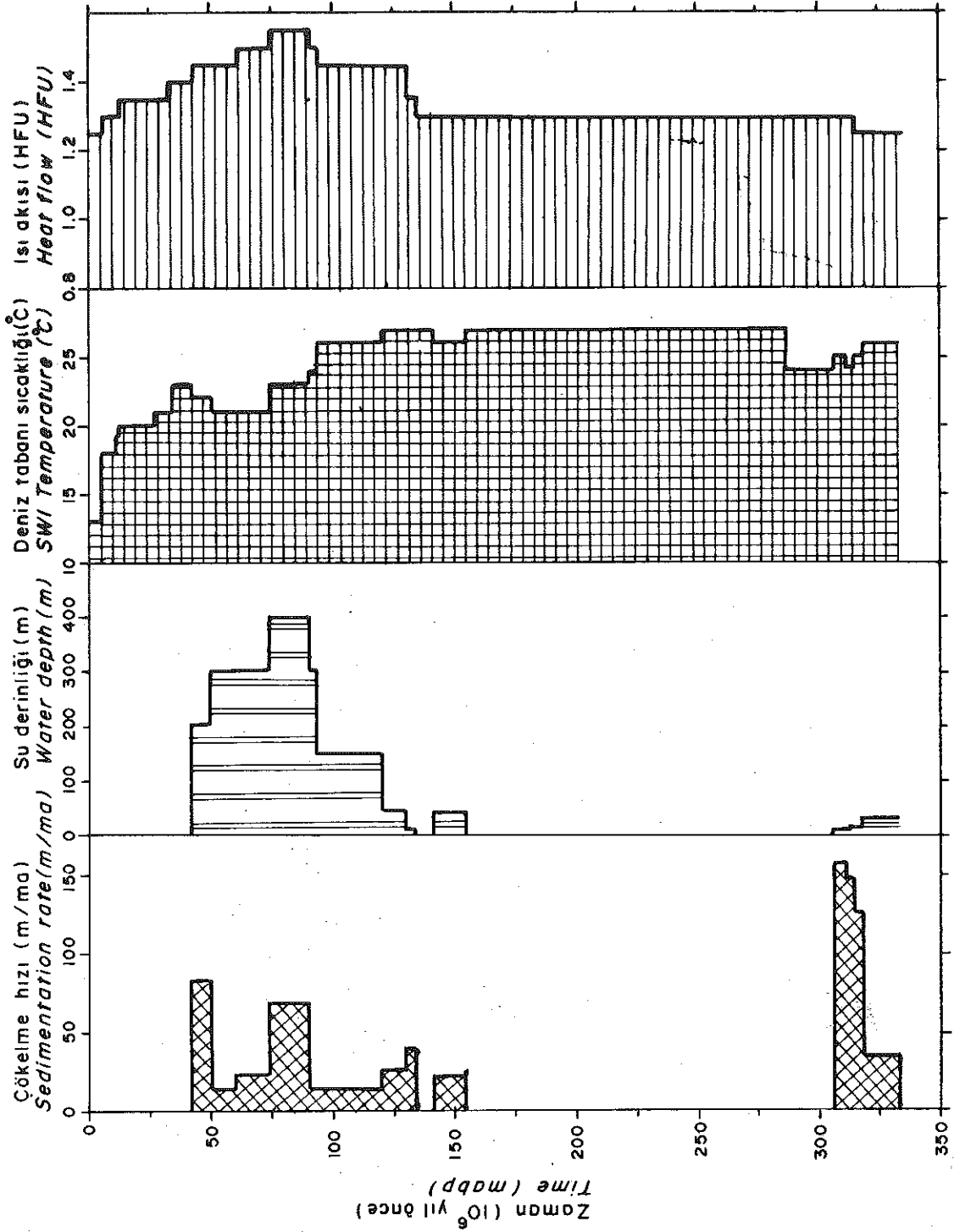
Bilgisayar destekli modelleme yönteminin yardımıyla çok sayıda jeolojik sürecin modellenmesi mümkün olmaktadır. Bunlar arasında, çökellerin birikmesi ve sıkışması (kompaksiyon); hidrostatik ve hidrodinamik basınç gelişimi; su ve diğer formasyon akışkanlarının hareketi; ısı transferi ve sıcaklık evrimi; organik madde metamorfizması; petrol ve doğal gazın oluşumu; aşınma, fay, sürüklenme, diyapir gibi yapısal unsurların gelişmesi bulunmaktadır.

Zonguldak Havzasındaki Gelik-44 kuyusunda gerçekleştirilen bir boyutlu (1-D) modellemenin bazı sonuçları uygulamaya örnek olarak aşağıda sunulmuştur. Gelik-44 kuyusu Zonguldak ili doğu-güneydoğusunda Kretase yaşlı örtü birimleri altındaki Karbonifer istifini test etmek amacıyla açılmıştır. Kuyudan sağlanan ve bölgesel jeolojiden elde edilen veriler kullanılarak havzanın bu kesimdeki gelişimi Namuriyenden başlanarak günümüze kadar yukarıda tanımlanan genel yaklaşım kullanılarak modellenmiştir. Modellemeye günümüze 333 milyon yıl önce başlanmış ve günümüze kadar süren modelleme için çökeltme ve aşınma dönemlerinden oluşan toplam 25 jeolojik zaman birimi ayırt edilmiştir. Jeolojik evrim, Karbonifer sonuna kadar süren hızlı bir çökeltme dönemi, bunu izleyen ve Geç Jura'ya kadar etkili olan aşınma, Jura sonu Kretase başındaki bir kesiklik dışında Geç Jura-Orta Eosen'deki ikinci bir çökeltme ve yaklaşık 42 milyon yıl önce başlayıp halen sürmekte olan bir ikinci aşınma dönemi ile karakterize edilir. Ayırtlanmış her zaman birimi için, birimin niteliği (çökeltme, aşınma, çökeltmezlik vb.), süresi, litolojisi, kalınlığı, gözenekliliği, su derinliği, deniz tabanı sıcaklığı ve ısı akışı input olarak kullanılmıştır. Bunlardan önemlilerinin zamana bağlı değişimleri Şekil-2'de gösterilmiştir. Ölçülen ve modelleme yoluyla hesaplanan parametreler arasında uyum sağlanmasının ardından modelleme sonuçlarının analizi aşamasına gelinmiştir. Havzadaki gaz oluşumunun zamana bağlı gelişimi açısından önemli olan sıcaklık evrimi Namuriyen yaşlı birim için Şekil-3'de, sıcaklık değişimlerinde etkili olan parametre belirtilerek, sunulmuştur. Bu sıcaklık değerleri kullanılarak kömürleşme derecesinin zamana bağlı değişimi "Easy-



Şekil 1. Bilgisayar destekli modelleme uygulamalarının akım şeması.

Figure 1. Flow chart of the computer-aided basin modelling method.

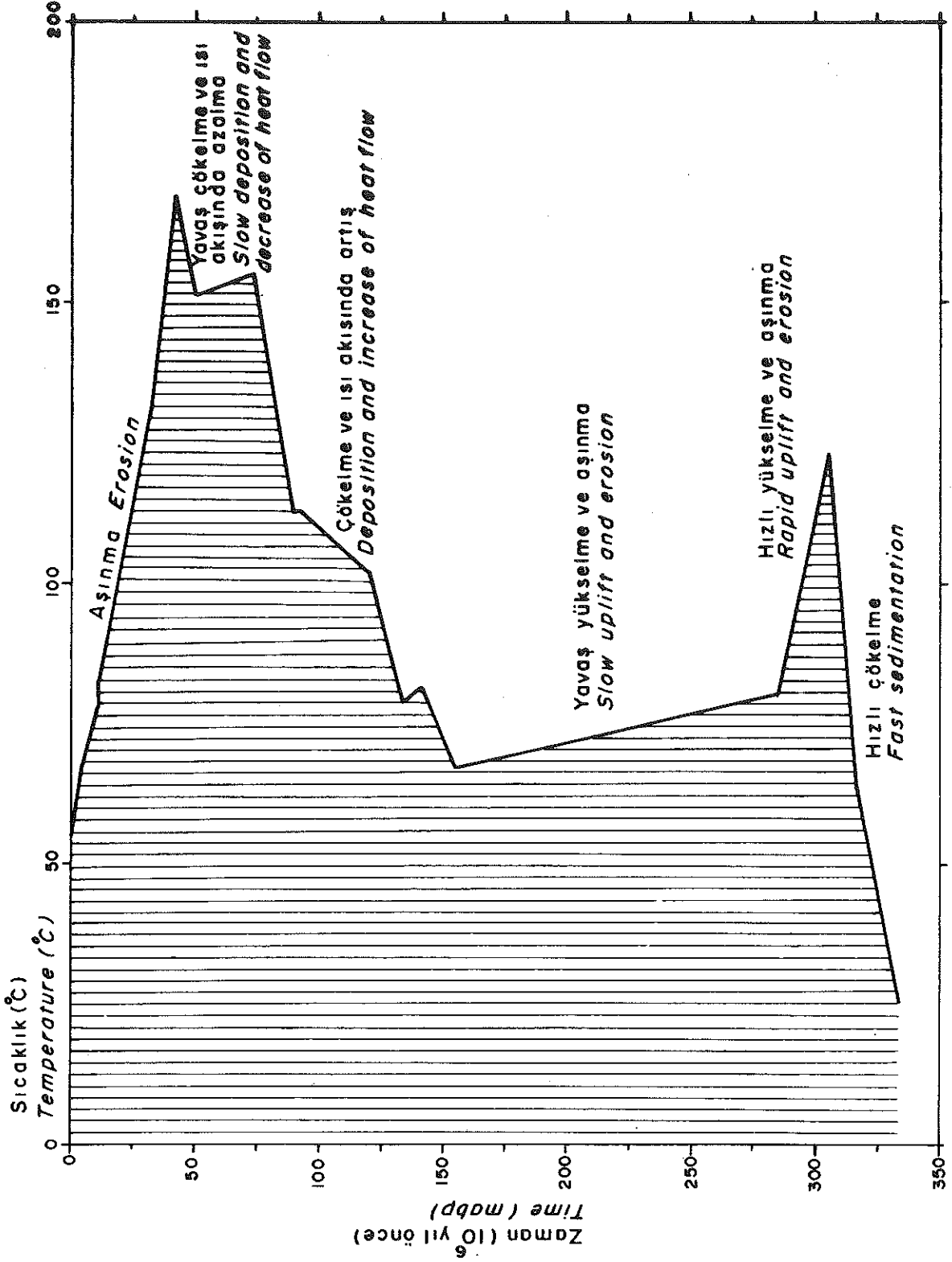


Şekil 2. Modellemede kullanılan input parametrelerinden çökelme hızı, su derinliği, deniz tabanı sıcaklığı ve ısı akısının zamana bağlı değişimleri.

Figure 2. Temporal distribution of sedimentation rate, water depth, sediment/water interface temperature and heat flow, which are among the input parameters used by modelling.

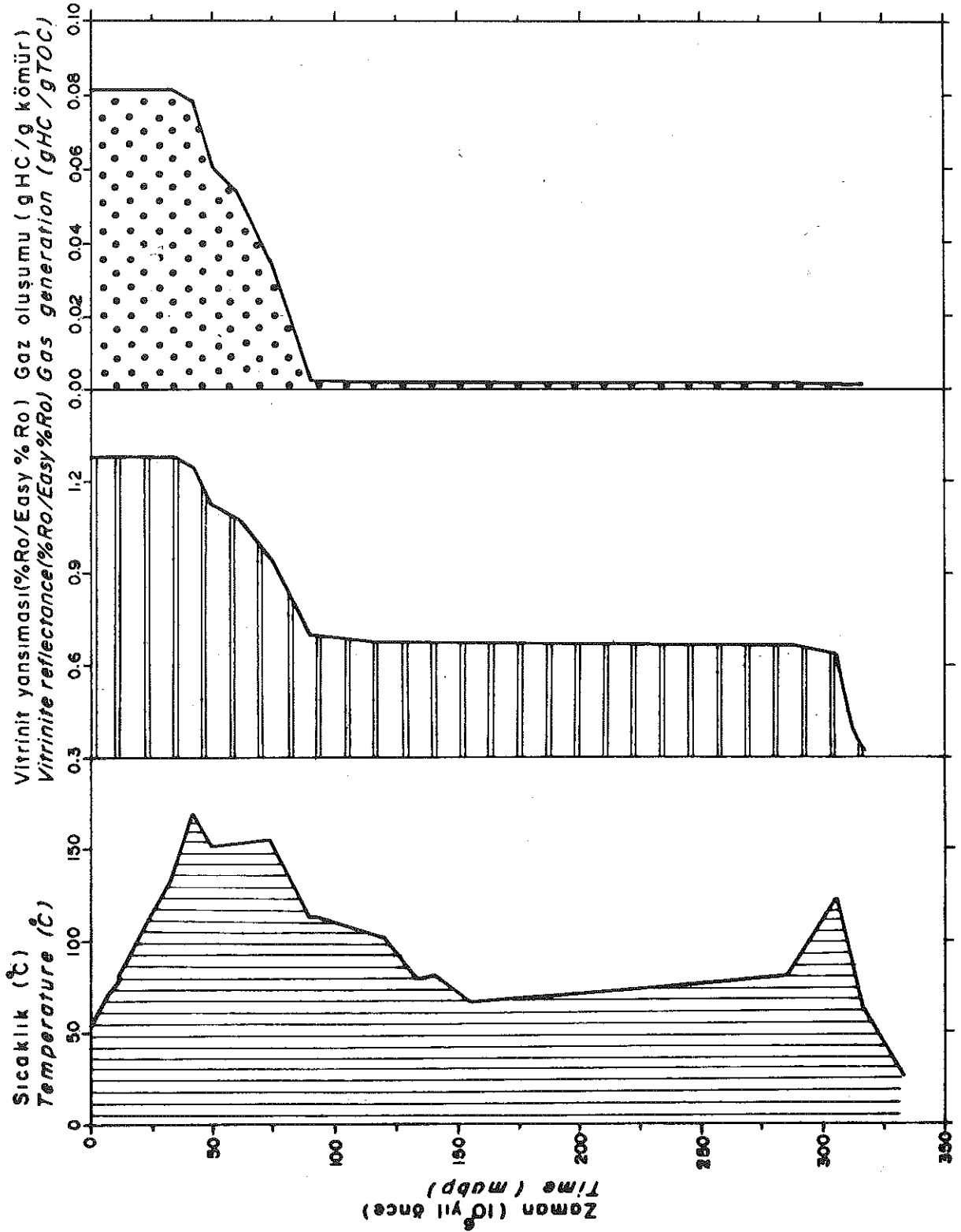
Ro yöntemiyle (Sweeney ve Burnham, 1990), gaz oluşumu ise Tissot ve Espitalié'nin (1975) kinetik yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil-4 Namuriyen yaşlı

birim için bu iki parametrenin zaman içindeki gelişmesini göstermektedir. Hem kömürleşme derecesi hem de gaz oluşumundaki kritik değişimlerin ikinci çökelme dö-



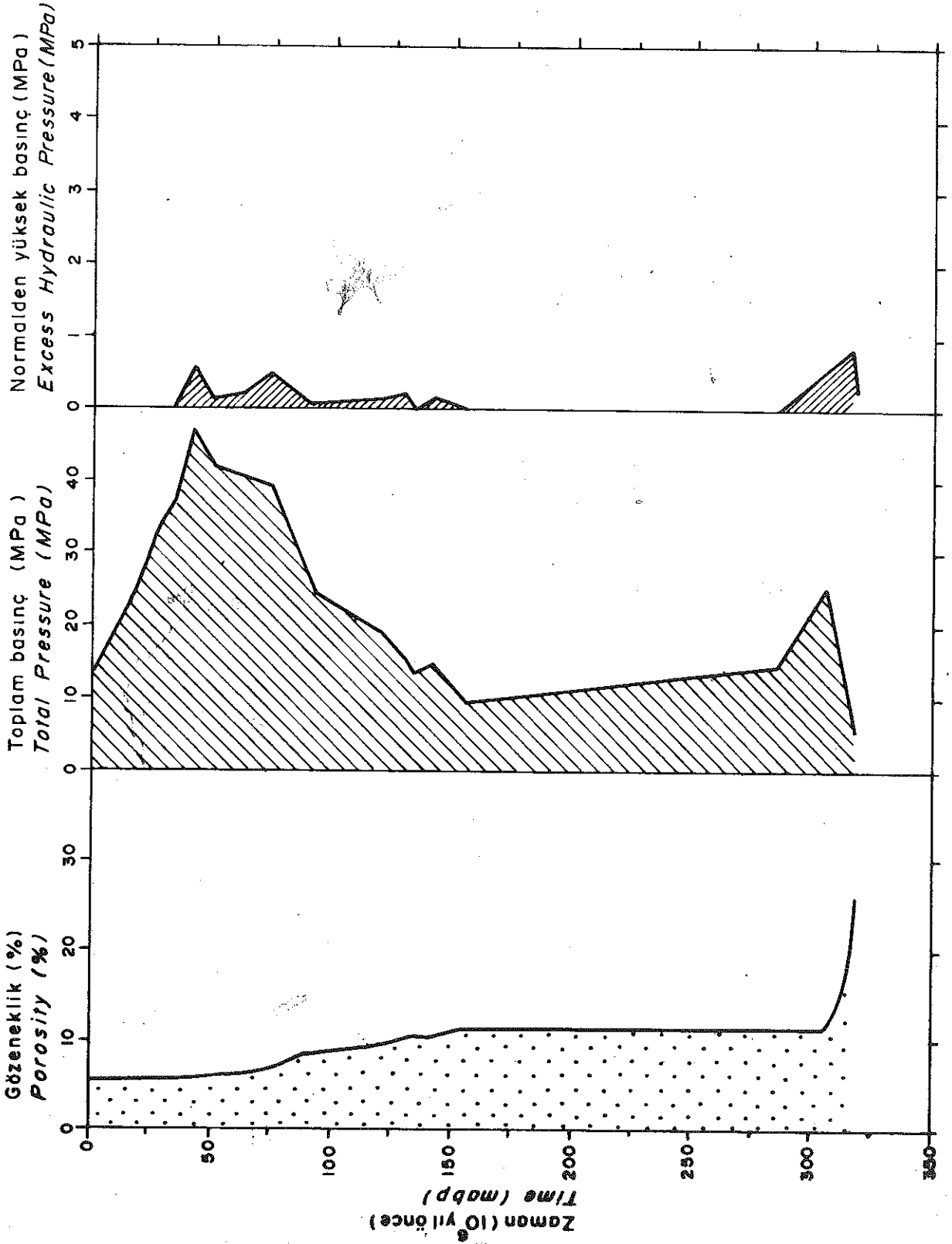
Şekil 3. Zonguldak Havzası Gelik-44 kuyusunda Namuriyen yaşlı birimdeki sıcaklığın zamana bağlı değişimleri ve bu değişimlerin jeolojik nedenleri.

Figure 3. Temporal development of temperature of the Namurian unit and geological controls of this development at the well Gelik-44 in the Zonguldak Basin.



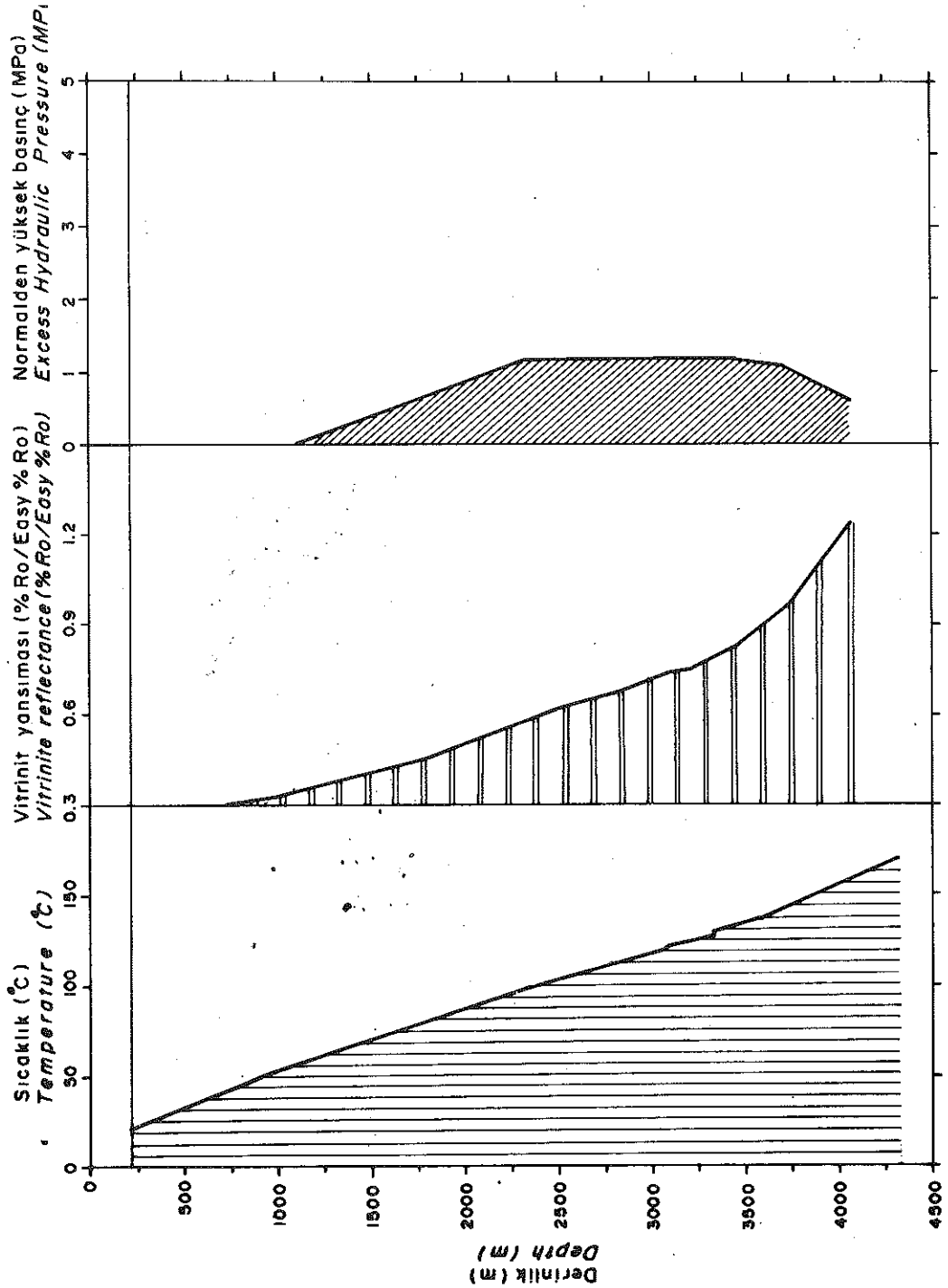
Şekil 4. Zonguldak Havzası Gelik-44 kuyusunda Namuriyen yaşlı birimde sıcaklık, olgunluk (vitrinit yansımaları) ve hidrokarbon oluşumunun zamana bağlı değişimleri.

Figure 4. Temporal development of temperature, maturity (vitrinite reflectance) and hydrocarbon generation of the Namurian unit at the well Gelik-44 in the Zonguldak Basin.



Şekil 5. Zonguldak Havzası Gelik-44 kuyusunda Namuriyen yaşlı birimde porozite, toplam basınç ve normalden yüksek basınçın zamana bağlı değişimleri.

Figure 5. Temporal development of porosity, total pressure and excess pressure of the Namurian unit at the well Gelik-44 in the Zonguldak Basin.



Şekil 6. Zonguldak Havzası Gelik-44 kuyusunda güntümüzden 42 milyon yıl önce sıcaklık, olgunluk (vitrinit yansımaları) ve normalden yüksek basıncın derinliğe bağlı değişimleri.

Figure 6. Distribution of temperature, maturity (vitrinite reflectance) and excess pressure as a function of depth at 42 mybp at the well Gelik-44 in the Zonguldak Basin.

nemi esnasında meydana geldiği açıkça görülmektedir. Bu birimde kompaksiyona bağlı olarak gelişen gözeneklilik, hidrostatik ve hidrodinamik basınç değişimleri ise Şekil-5'de gösterilmiştir. Karbonifer, Üst Kretase ve Eosen dönemlerindeki yüksek çökme hızları Namuriyen yaşlı birimdeki gözenek basıncının hidrostatik basıncın üzerine çıkmasına neden olmuştur. Bu yüksek basınç aşınma dönemlerinde ortadan kalkmış ve sistem hidrostatik dengesine ulaşmıştır.

Benzeri analizler, her birim için gerek zamana ve gerekse herhangi bir jeolojik zaman için derinliğe bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Sıcaklık, basınç ve kömürleşme derecesinin ikinci aşınma döneminin hemen öncesindeki (42 milyon yıl önceki) değerleri Şekil-6'da gösterilmiştir.

SONUÇLAR

Bilgisayar destekli modelleme yöntemi son on yıldaki uygulamalarıyla özellikle havzaların petrol ve doğal gaz potansiyelinin belirlenmesine önemli katkılarda bulunmuştur (Ungerer vd. 1984; Yalçın, 1988; Yalçın vd., 1988; Novelli vd., 1988). Ancak sözkonusu yöntem yer bilimlerine bunun da ötesinde önemli yenilikler getirmiştir. Bunların başında, jeolojik zaman boyutunun uzunluğu nedeniyle şimdiye kadar sağlanamayan deneysel ortamın sağlanması, jeologun değişik hipotezleri test etme şansına kavuşması, çok parametrelili ve karmaşık jeolojik sistemlerin mantıksal bir bütünlük içinde incelenbilmesi ve jeolojideki önemli eksikliklerden biri olan sayısallaştırmanın sağlanması gelmektedir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- Bonham-Carter, G. F. and Harbaugh, J. W., 1968.** Simulation of Geologic Sytems: An Overview. Computer Contribution 22, Kansas Geology Survey, p. 3-10.
- Harbaugh, J. W. and Bonham-Carter, G. F., 1970.** Computer Simulation in Geology. John Wiley and Sons, New York, 575 pp.
- Novelli, L., Welte, D. H., Mattavelli, L., Yalçın, M. N., Cinelli, D. and Schmitt, K. J., 1988.** Hydrocarbon generation in southern Sicily-A three dimensional computer-aided basin modeling study. In: L.

Mattavelli and L. Novelli (Editors), *Advances in Organic Geochemistry 1987*. Org. Geochem., 13: 153-164.

- Swcency, J. J. and Burnham, A. K., 1990.** Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 74: 1559-1570.
- Tissot, B. and Espitalie, J., 1975.** L'évolution thermique de la matière organique des sédiments. Application d'une simulation mathématique. *Rev. Inst. Fr. Petrol.*, 30: 743-772.
- Ungerer, P., Chiarelli, A. and Oudin, J. L., 1984.** Modeling of petroleum genesis and migration with a bidimensional computer model in the Frigg sector, Viking Graben. In: B. M. Thomas, A. G. Doré, S. S. Eggen, P. C. Home and R. M. Larsen (Editors), *Petroleum Geochemistry in Exploration of the Norwegian Shelf*. Graham and Trotman, pp. 121-130.
- Welte, D. H. and Yüklér, M. A., 1981.** Petroleum origin and accumulation in basin evolution - A quantitative model: *AAPG Bull.*, v. 65, p. 1387-1396.
- Welte, D. H. and Yalçın, M. N., 1988.** Basin modeling-a new comprehensive method in petroleum geology. In: L. Mattavelli and L. Novelli (Editors), *Advances in Organic Geochemistry 1987*. Org. Geochem., 13: 141-151.
- Yalçın, M. N., 1988.** Numerical simulation of the geologic evolution, the thermal history and the hydrocarbon generation potential of the Adana Basin (South Turkey). *Abstr. AAPG Bull.*, 72: 1031-1032.
- Yalçın, M. N., 1991.** Basin modelling and hydrocarbon exploration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 5: 379-398.
- Yalçın, M. N. and Welte, D. H., 1988.** The thermal evolution of sedimentary basins and significance for hydrocarbon generation. *Turk. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 1:12-26.
- Yalçın, M. N., Welte, D. H., Misra, K. N., Mandal, S. K., Balan, K. C., Mehrotra, K. L. and Lohar, B. L., 1988.** 3-D computer-aided basin modeling of Cambay Basin, India-A case history of hydrocarbon generation. In: R. K. Kumar, P. D. Dwivedi, V. Banerjee and V. Gupta (Editors), *Petroleum Geochemistry and Exploration in the Afro Asian Region*. Balkema, Rotterdam, pp. 417-450.