

Karmaşık jeolojik ortamlarda gelişen hidrokarbon kapan türlerinin patlayan yansıtıcı yöntemi ile modellenmesi

Modeling of hydrocarbon trap types developing in complex geological environments by exploding reflector method

Şerife BOĞAZKESEN^{*1,a}, Hakan KARSLI^{2,b}

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 27.09.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 23.03.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 14.04.2022

Öz

Karmaşık jeolojik ortamlarda gelişen yapısal ve stratigrafik hidrokarbon (petrol, gaz) kapanları, tektonik deformasyona maruz kalan bölgelerde veya yanıl yönde geçirimsiz kayaların bulunduğu yerlerde oluşurlar ve önemli miktarlarda hidrokarbon biriktirirler. Bu tür kapanların olduğu ortamlarda, yansımalar oldukça karmaşık davranış gösterirler. Dolayısıyla, bu tür karmaşık jeolojik ortamlarda sismik dalga yayılımını anlamak, yorumlama aşamasında önemli katkılar sağlar. Bu çalışmada, yapısal ve stratigrafik hidrokarbon kapanlarının modellenmesi patlayan yansıtıcı (PY) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Yöntemin en önemli avantajları sismik kaynağın yansıtıcı ara yüzeylerine konulması ve tek yol seyahat zamanı ile yüzeydeki alıcılarda kaydedilmesidir. Dolayısıyla, hesaplama sonucunda doğrudan sıfır ofset kesitler elde edilmiştir. Kaynaktan yayılan sismik dalgalarının sayısal hesaplaması isteğe bağlı farklı özelliklerde giriş modelleri seçebilme yeteneği ve dalga yayılım problemlerine doğrudan çözüm sağlaması nedeniyle oldukça kullanışlı olan sonlu farklar yöntemi (SFY) ile yapılmıştır. Böylece, patlayan yansıtıcı tekniğine dayalı olarak SFY ile tam dalga alanının çözümü sayesinde hidrokarbon araştırmalarında sıklıkla karşılaşılan kanal, antiklinal, senklinal, normal fay tipi kapanların sismik modelleri kolay ve hızlı bir şekilde hesaplanmıştır. Sonuç olarak, PY tekniği ile sıfır ofset kesitlerinin (yığma kesitleri) elde edilmesi, pratik olarak gerçek sismik verilerin yorumlanmasında yorumcuya önemli katkılar sağlayacağı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hidrokarbon kapanı, Patlayan yansıtıcı, Sismik modelleme, Sonlu farklar yöntemi

Abstract

Structural and stratigraphic hydrocarbon (oil, gas) traps that develop in complex geological environments are formed in regions subjected to tectonically deformation or where there are impermeable rocks in the lateral direction and accumulate significant amounts of hydrocarbons. Reflections from the subsurface media including such traps indicate highly complex behaviour. Therefore, understanding seismic wave propagation in such environments provide important contributions to the interpretation stage. In this study, the modeling of structural and stratigraphic hydrocarbon traps was carried out with exploding reflector (ER) technique. The most important advantages of the method is that the seismic source is located at the reflective interfaces and recorded by the receivers at the surface with the one way travel time. Therefore, as a result of the calculation, directly zero offset sections could be obtained. Numerical calculation of the seismic waves propagated from the source was made by the finite difference method (FDM) which is very useful due to the ability to choose arbitrary input models with different features and provide direct solutions to wave propagation problems. Thus, seismic models of channel, anticline, syncline, normal fault type traps which are frequently encountered in hydrocarbon explorations were calculated easily and quickly by means of the solution of the full wave field with FDM based on the exploding reflector technique. As a result, it has been shown that obtaining zero offset sections (stacked sections) with the ER technique will practically make important contributions to the interpreter during the interpretation of real seismic data.

Keywords: Hydrocarbon trap, Exploding reflector, Seismic modelling, Finite difference method

*a Şerife BOĞAZKESEN; serifebogazkesen@atauni.edu.tr, Tel: (0537) 290 82 14, 0000-0002-5400-4790

^b orcid.org/0000-0002-7758-1363

1. Giriş

1. Introduction

Karmaşık jeolojik ortamlarda gelişen hidrokarbon kapanları, yapısal, stratigrafik veya bunların bileşimi şeklinde oluşmaktadır ve bu karmaşıklıklarından dolayı sismik kesitlerde yüksek ayrımlı görüntülenmeleri çoğunlukla zorlaşmaktadır (Fagin, 1991). Çünkü, karmaşık özelliklere sahip kapanların bulunduğu ortamlarda sismik dalga yayılımı oldukça karmaşık davranış göstermektedir. Dolayısıyla, bu kapanların sismik tepkilerinin nasıl olacağını anlamasının önem arz etmektedir.

Sıfır ofset sismik kesitlerin modellenmesi için yapay sismogramların hesaplanması patlayan yansıtıcı (PY) tekniğinin kullanımını ile gerçekleştirilebilir (Loewenthal vd., 1976; Carcione vd., 1994). Bununla birlikte, yöntemde yeraltındaki yansıtıcılardan yüzeydeki alıcılara doğrudan dalga yayılımını içerdiğinden PY tekniği yansıma olmayan dalga denklemi (non-reflecting wave equation) olarak da isimlendirilmiştir (Baysal vd., 1984). PY tekniği sismik veriye benzerlik gösteren yer radarı verilerinin modellenmesinde de başarılı şekilde uygulanmıştır (Carcione vd., 2002) ve bu teknik ile iki yol zamanı içeren yansıma modellenmesinin aksine saçılma ve yansıma olaylarının doğru seyahat zamanlarının hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Cooper vd. (2010) yüksek hızlı kama modelinin geometrisini ve hızını kullanarak patlayan yansıtıcı yöntemi ile sayısal modelini hesaplamışlardır ve elde edilen modelde tekrarlıların oluştuğunu, ancak sonlu fark algoritmasının akustik olmasından dolayı mod dönüşümlerinin oluşmayacağını belirtmişlerdir. Dolayısıyla, patlayan yansıtıcı yöntemi ile model üzerindeki olayların daha kolay yorumlanabileceğini ifade etmişlerdir. Nejati and Hashemi (2012) PY tekniğini farklı yer ortamlarının sismik modellerini ve göçünü hesaplamak için kullanmışlardır. Zhu & Huang (2015) patlayan yansıtıcı kavramını kullanarak sıfır ofset veriler için Ters Zaman Göç (Reverse Time Migration-RTM) probleminin çözümünde Yee (1966) tarafından geliştirilen algoritmayı uygulayarak akustik dalga denkleminin bir çözümünü gerçekleştirmişlerdir ve algoritmalarını kum tepesi içeren bir stratigrafik yer modeli üzerinde test etmiştir. Franco vd. (2018) CREWES tarafından geliştirilen kodları kullanılarak patlayan yansıtıcı yaklaşımı ile jeotermal bir sahada belirli bir hat boyunca yapay sismik yansıma modellenmesini gerçekleştirmiş ve jeotermal rezervuar modellenmesine ilişkin jeolojik ve

jeofizik varsayımların doğruluğunu test etmişlerdir.

Patlayan yansıtıcı yönteminde, karmaşık hidrokarbon kapanlarının herhangi bir noktasındaki yer değiştirmesini hesaplayabilmek için sismik dalga denkleminin uygulanabilen ve diferansiyel denklemleri çözebilen Sonlu Fark Yöntemi (SFY) ile başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Sismik dalga alanı, sonlu fark formülleri ile dalga denkleminin türevlerini yaklaşık olarak değerlendirerek ve sonuçlanan fark denklemini yinelemeli olarak çözerek her bir grid noktasında hesaplamaktadır. Sonlu fark yöntemi, geçmiş zamanlardaki dalga alanını kullanarak şimdiki ve gelecek zamanlardaki dalga alanını belirlemede son derece başarılı şekilde uygulanmaktadır (Marfurt, 1984; Carcione vd., 2002; Margrave, 2003; Moczo vd., 2007).

Bu çalışmada kanal, antiklinal, senklinal ve normal fay tipi kapan modelleri için patlayan yansıtıcı tekniğine dayalı olarak SFY ile doğrudan sıfır ofset sismik modelleri Youzwishen ve Margrave (1999) hesaplanmıştır. Bu jeolojik yapıların uzaysal konumları ve sismik dalga yayılımına tepkileri değerlendirilmiştir.

2. Yöntem

2. Method

2.1. Patlayan yansıtıcı yöntemi

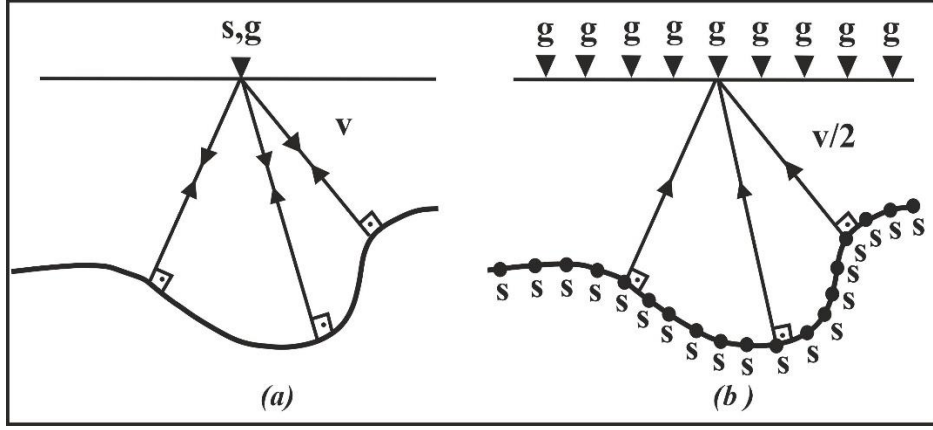
2.1. Exploding reflector method

Sismik veri elde edilirken hem alıcılar hem de kaynak noktaları yeryüzüne yerleştirilir. Bu işlem, iki yönlü seyahat zamanını gerektirir. Bununla birlikte, sıfır ofset kesit, tek bir kaynak ve tek bir alıcı ile aralarında ayırım olmaksızın hat boyunca hareket ettirilerek kaydedilir (Şekil 1a). Kaydedilen enerji, yansıtıcı ara yüzeylerinden normal geliş açısı olan ışın yollarını takip etmektedir.

Aynı sismik kesiti üreten alternatif bir geometri ise Şekil (1b)'de verilmiştir. Yansıtıcı ara yüzeyler boyunca yerleştirilmiş olan patlayan kaynakların ve hat boyunca her ortak orta nokta (OON) konumunda yüzeyde alıcıların olduğu varsayılmaktadır (Loewenthal vd., 1976). Kaynaklar birlikte patlar ve yukarı doğru yüzeyde yerleştirilmiş alıcılara doğru yayılan dalgalar gönderir. Patlayan yansıtıcıdan yansıyan dalga, OON kesitinde kaydedilenlerin tam olarak yarısına eşit zamanlarda yer yüzeyine ulaşacaktır. Böylece elde edilen yer modeli, patlayan yansıtıcı modeli olarak adlandırılmaktadır (Loewenthal, 1996).

Patlayan yansıtıcı modelinden elde edilen sismik kesit, büyük ölçüde sıfır ofset kesitine eşdeğerdir. Ayrıca, eğer saçılma üretecek süreksizlikler yok ve ara yüzeyler yatay ya da yataya yakın ise yığma sonrası göç kesitlerini de temsil ederler. Sıfır ofset kesiti iki yönlü seyahat zamanı olarak kaydedilirken (kaynaktan yansıma noktasından

alıcıya), patlayan yansıtıcı modeli tek yönlü seyahat zamanı olarak kaydedilir (kaynağın yansıma noktasına yerleştirildiği yerden alıcıya). Sıfır ofset kesit ile patlayan yansıtıcı modeli arasındaki eşdeğerlik, özellikle yanal hız değişimlerinin varlığında tam olarak kesin değildir (Kjartansson & Rocca, 1979).



Şekil 1. (a) Sıfır ofset kaydının geometrisi ve (b) patlayan yansıtıcı sıfır ofset kaydının varsayımsal modelleme geometrisi. Burada s kaynağı, g alıcıları ve v ortam hızını temsil etmektedir (Claerbout, 1985).

Figure 2. (a) The geometry of the zero offset records and (b) hypothetical modeling geometry of the exploding reflective zero offset records. Here s is the source, g is the receivers and v is the media velocity of the medium (Claerbout, 1985)

Patlayan yansıtıcı modellemesinde, sonlu fark yaklaşımı kullanılarak belirli bir hız modeli için iki boyutlu (2B) bir dalga alanı zaman ortamında

hesaplanmaktadır. İki boyutlu (2B) skaler dalga denklemi aşağıdaki denklem (1) ile verilmiştir.

$$\nabla^2 \Psi(x, z, t) = \frac{\partial^2 \Psi(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, z)} \frac{\partial^2 \psi(x, z, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

Sabit yoğunluklu, akustik ortamdaki Ψ dalga potansiyelini, t zamanı (saniye-s), v hızı (metre/saniye-m/s), ∇^2 Laplace operatörünü ve (x, z) uzaysal koordinatları temsil etmektedir. Ancak, dalga denkleminin analitik (çözümlemeli) çözümlerinin sayısı çok azdır ve dalga alanı modellemelerini gerçekleştirmek için genellikle yaklaşık bir çözüm yöntemi kullanılmaktadır.

Sonlu farklar (Kelly vd., 1976), sonlu eleman (Malfurt, 1984) ve Fourier ortamında uygulanabilen yapma spektral yöntemler (Kosloff & Baysal, 1982) gibi çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir.

Dalga alanının hesaplanması için denklem (2) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Psi(x, z, t + \Delta t) = [2 + \Delta t^2 v^2(x, z) \nabla^2] \Psi(x, z, t) - \Psi(x, z, t - \Delta t) \quad (2)$$

Denklem (2), denklem (1)'in ikinci dereceden merkezi sonlu fark yaklaşımının sonucudur. Hız modeli ve dalga alanı t ve t - Δt zamanı kullanılarak hesaplanabilir. Çözümdeki kararlılık koşulu denklem (3) ile aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\frac{v_{\max} \Delta t}{\Delta x} \leq \sqrt{3/8} \quad (3)$$

Burada; v_{\max} maksimum hızı (metre/saniye-m/s), Δx ve Δt sırasıyla uzaysal ve zamansal örnekleme aralığını göstermektedir.

3. Yapay sismik modeller

3.1. Synthetic seismic models

Yapay modelleme için sırasıyla kanal, antiklinal, senklinal ve normal fay kapanı olan dört farklı hız

modeli oluşturulmuştur. Modellemede kullanılan kaynak fonksiyonu, uzaysal ve zamansal hesaplama parametrelerine ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Modelleme için gerekli olan yansıtıcı ara yüzeyler, derinlik ve uzaysal konum bilgileri sayısallaştırılarak elde edilmiştir.

Tablo 1. Patlayan yansıtıcı modellemesinde kullanılan parametreler

Table 1. Parameters used in exploding reflector modeling

Patlayan Yansıtıcı Modellemesinde Kullanılan Parametreler								
	Profil uzunluğu (m)	Maks. derinlik (m)	Maks. hız (m/s)	Min. hız (m/s)	Hesaplama zaman adımı (ms)	Örnekleme zamanı (ms)	Kayıt uzunluğu (ms)	Kaynak dalgacığı (Hz)
<i>Kanal</i>	2500	1000	4000	1500	0.05	4	1500	30
<i>Antiklinal</i>	2000	1000	4000	2000	0.05	4	1500	30
<i>Senklinal</i>	2500	1000	4000	1500	0.05	4	1500	30
<i>Normal</i>								
<i>Fay</i>	2500	1000	4000	1000	0.05	4	1500	30
<i>Kapanı</i>								

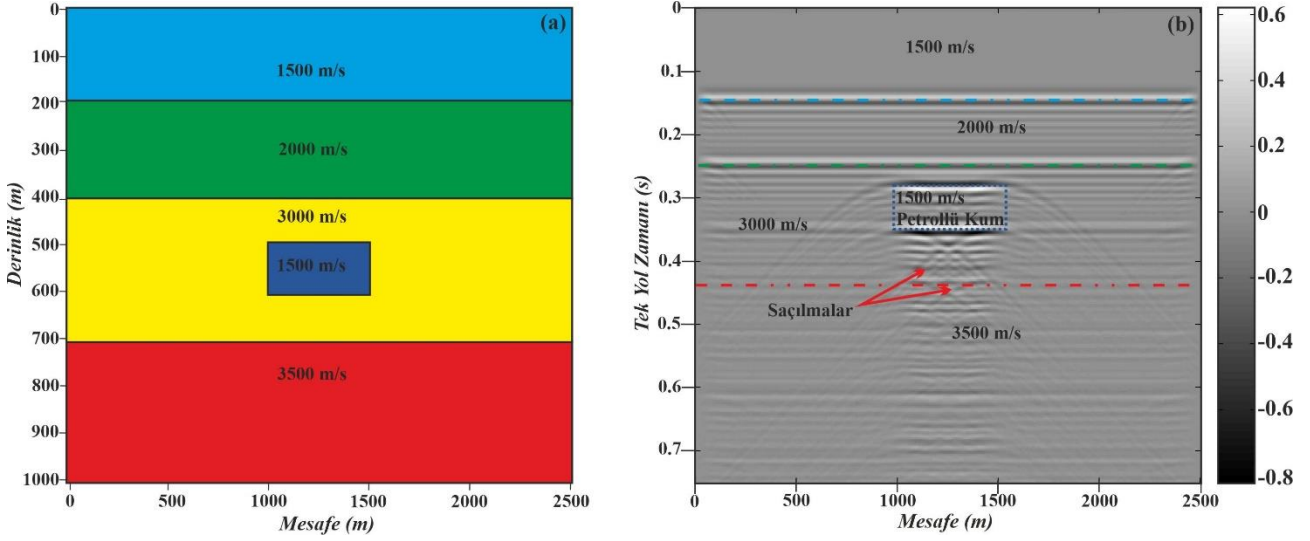
Bu dört farklı modelin sismik kesitini oluşturmak için grid aralığı 5 m ve kaynak dalgacığı $f=30$ Hz minimum fazlı Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Hesaplama grid aralığının seçimi önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada 5m'den daha büyük grid aralıklarının kullanılması ardışık yansımaların (Reverberasyon) oluşmasına neden olurken, daha ince bir grid aralığı kullandığında ardışık yansımalar oluşmamış ancak, hesaplama zamanı artmıştır. Bununla birlikte grid dispersiyonunu önlemek için birkaç farklı testten sonra uygun olan $f=30$ Hz kaynak dalgacığı kullanılmıştır. Böylece, sonlu fark yöntemi ile doğru modelleme için en uygun parametreler seçilerek, PY sıfır ofset kesitleri hesaplanmıştır.

3.1.1. Kanal modeli

3.1.1. Channel model

Son yıllarda, kanal yapılar hidrokarbon araştırma açısından önemli olan bir kapan yapısı olarak değerlendirilmektedir (Shuxin vd., 2017).

Dünyadaki çok sayıda petrol ve gaz sahasının kanal ortamlarında biriktiği tespit edilmiştir (Mohebian, vd., 2018). Kanal modelleri genellikle, 5-40 km uzunluğunda, 100-900 m genişliğinde olup daha az kıvrımlı yapılar olarak karakterize edilmektedir. Bu nedenle, kanal sistemleri, hidrokarbon içermeye olası yüksek olan kapanlar olarak değerlendirilmektedir. Bazen kanallar uyumsuzluklarla kesilmekle birlikte, gözenekli ve geçirgen özellikte olduklarından, bu kanallar hidrokarbon ile dolabilir ve yüksek kaliteli rezervuarlar oluşabilir. Şekil (2a), tabakalı bir ortamdaki kanal hız modelini temsil etmektedir. Kanal modeli, 550 m genişliğinde ve 100 m kalınlığında düzgün dikdörtgen bir yapıdadır. Kanal model için yapay sismogram hesaplama parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil (2b)'de patlayan yansıtıcı tekniği yaklaşımı ile SFY kullanılarak elde edilen yapay sismik kesit görülmektedir. Kanal yapısı, her tarafındaki süreksizliklerden dolayı saçılma enerjisine neden olmuştur.



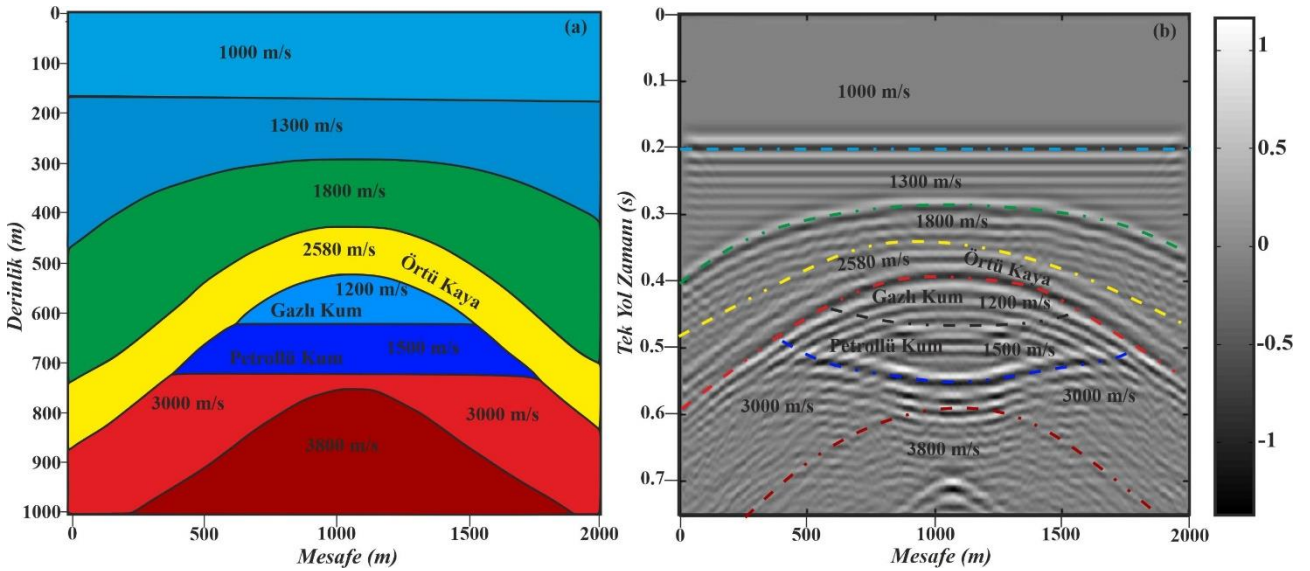
Şekil 2. (a) Yeraltı derinlik-hız modelini ve (b) kapan yapısının patlayan yansıtıcı modelini göstermektedir.
Figure 2. (a) Subsurface depth-velocity model including channel trap and (b) shows the exploding reflector model of the trap structure.

3.2. Antiklinal modeli

3.2. Anticlinal model

Antiklinal yapıları Dünya’da en yaygın görülen petrol-gaz kapanlarıdır ve yer kabuğunun açılmış havzaların tabanında biriken tortuların, levhaların birbirine doğru hareket etmesi ile kıvrılıp yükselmesi sonucunda oluşmuş alanlardır (Sefünç, 2017). Çukur alanlarda biriken petrol antiklinalin tepesine doğru göç etmektedir ve burada birikmektedir. Kapanın en alt kısmı genellikle düzlemseldir ve petrol-su dokanağı ile sınırlıdır.

Şekil (3a)’da üç tabakalı bir ortamdaki antiklinal hız derinlik modeli verilmiştir. Şekil (3b)’de ise, patlayan yansıtıcı sismik model kesiti görülmektedir. Patlayan yansıtıcı kesitindeki, 1800 m/sn hıza sahip olan antiklinalin tepe noktasında yansıma genliğinde artış ve içbükey yukarı kısımda ise yansıma genliğinde bir azalma oluşmaktadır. Bununla birlikte, gaz ve petrol rezervuarının kalın ve hızın oldukça düşük olması, antiklinal kapanlarda sıklıkla karşılaşılan hız itmesi problemi nedeniyle yansımalar dışa doğru bükülmüştür.



Şekil 3. (a) Antiklinal derinlik-hız modelini ve (b) antiklinal yapısının patlayan yansıtıcı modelini göstermektedir.

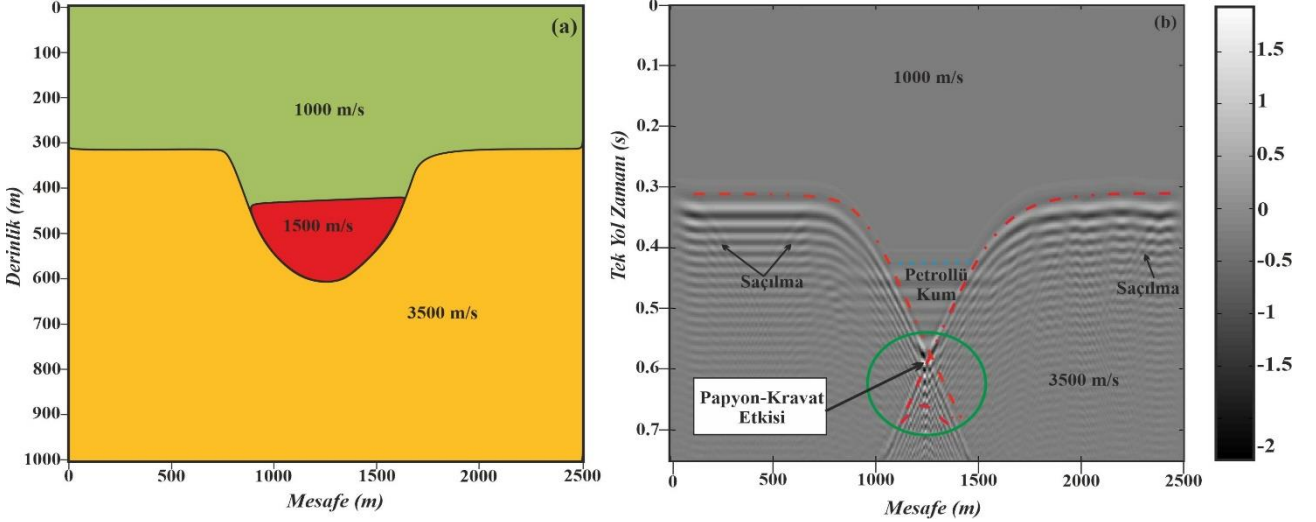
Figure 3. (a) Subsurface depth-velocity model including anticlinal trap and (b) shows the exploding reflector model of the anticline structure.

3.3. Senkinal modeli

3.3. Syncline model

Senkinal yapısı tabakaların havza veya vadi şekilli kıvrımlanması ile oluşmaktadır. Bu yapılarda üst tabaka alt tabakadan daha genç olup genelde eksen düzlemine ters yapıdadırlar. Yeraltında senkinal türü bir çökelti varsa, birbirinden farklı zamanlarda

çok sayıda yansıma gözlemlenmektedir. Bu oluşan yansıma benzerliğinden dolayı papyon-kravat (bow-tie) olarak isimlendirilir ve sismik kesitlerde görülen bu tür yansımalar senkinal yapıların varlığını gösterir. Şekil (4a)'da senkinal hız derinlik modeli ve Şekil (4b)'de ise patlayan yansıtıcı modeli görülmektedir.



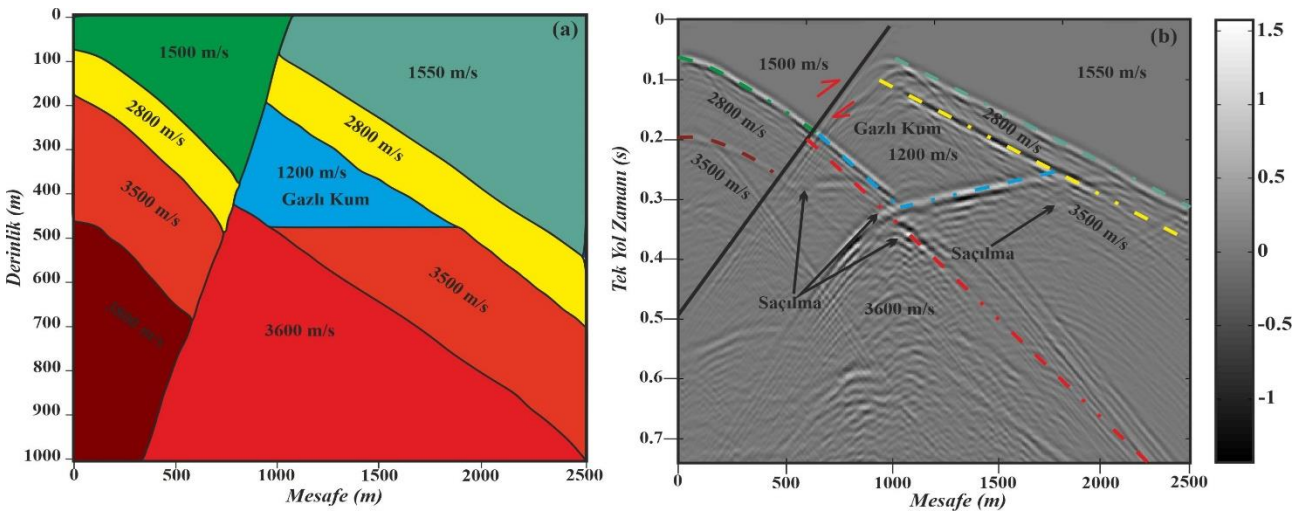
Şekil 4. (a) Senkinal derinlik-hız modeli ve (b) senkinal yapısının patlayan yansıtıcı modelini göstermektedir.
Figure 4. (a) Subsurface depth-velocity model including syncline trap and (b) shows the exploding reflector model of the syncline structure.

3.4. Normal fay kapanı modeli

3.4. Normal fault trap model

Normal faylar, doğrudan veya dolaylı olarak hidrokarbonların göçünü ve birikmesini sağlamaktadır (Hardman & Booth, 1991). Dolayısıyla normal faylanmaya bağlı olarak

normal fay kapanları oluşmaktadır. Oluşan bu kapanlar iki fayın veya birçok fayın kesişmesi ile meydana gelmektedir. Şekil (5a) ve Şekil (5b) sırasıyla model yapısının hız-derinlik modelini ve patlayan yansıtıcı modelini göstermektedir. Şekil (5b)'de fayın altından gelen yansımaların yansıtıcı derinliği arttıkça bozulduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. (a) Normal fay kapanı derinlik-hız modeli ve (b) normal fay kapanı yapısının patlayan yansıtıcı modelini göstermektedir.

Figure 5. (a) Subsurface depth-velocity model including normal fault trap and (b) shows the exploding reflector model of the normal fault trap structure.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada, karmaşık jeolojik ortamlarda oluşan kanal, antiklinal, senklinal ve normal fay kapanı tipi hidrokarbon kapanlarının sıfır ofset kesitlerinin hesaplanması patlayan yansıtıcı tekniği yaklaşımı ile akustik dalga denkleminin SFY sayısal çözümü sayesinde yapılmıştır. Böylece, dalga alanı yayılımı hızlı ve doğru bir şekilde modellenebilmiştir. Ayrıca grid boyutunun uygun boyutlarda seçildiğinde ardışık yansımaların oluşmasının önlenildiği ve hesaplama zamanının azaldığı belirlenmiştir. Patlayan yansıtıcı tekniğinden elde edilen sismik kesitlerin, açık olarak standart veri işlem ile elde edilen sıfır ofset kesitleri temsil ettiği görülmüştür. Dolayısıyla, eğimli tabakalar, fay, bindirme, resif, tuz domu, kanallar, antiklinal, senklinal vb. gibi karmaşık yeraltı jeolojik yeraltı yapılarının patlayan yansıtıcı tekniği ile sismik modellerinin hesaplanması, bu yapıların sismik kesitlerde daha iyi tanımlanmasında ve uzaysal konumlarının doğru belirlenmesinde yorumculara yardımcı ve yol gösterici olacaktır.

Teşekkür

Acknowledgement

Yazarlar, elastik dalga araştırma sismolojisi inceleme konsorsiyumuna (CREWES-the Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology) ve bu çalışmada kullanılan sonlu fark modelleme kodunu geliştirmedeki çalışmaları için Carrie Youzwishen'e teşekkür eder. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacıardan Karlı; makale fikrinin oluşturulması, makale içeriğinin, yazımının ve ilerleyişinin denetlenmesi hususunda katkı sunmuştur. Boğazkesen ise; makalenin literatür verilerinin elde edilmesi, hazırlanması, model hesaplarının yapılması, düzenlenmesi ve ilgili modellerin değerlendirilmesinde katkı sunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara

uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Baysal, E., Koslof, D. D., & Sherwood, J. W. C. (1984). A two-way nonreflecting wave equation. *Geophysics*, 49(2), 132-141. <https://doi.org/10.1190/1.4441644>.
- Carcione, J. M., Böhm, G., & Marchetti, A. (1994). Simulation of a CMP seismic section. *Journal of Seismic Exploration*, 3, 381-396.
- Carcione, J. M., Feliciangeli, L. P., & Zampano, M. (2002). The exploding-reflector concept for ground-penetrating-radar modeling. *Annals of Geophysics*, 45(3-4). <https://doi.org/10.4401/ag-3526>.
- Claerbout, J. F. (1985). Imaging the earth's interior. *Blackwell Scientific Publications*, 86(1), 217-219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1986.tb01086>.
- Cooper, J. K., Lawton, D. C., & Margrave, G. F. (2010). The wedge model revisited: A physical modeling experiment. *Geophysics*, 75(2). <https://doi.org/10.1190/1.3309641>.
- Fagin, S. W. (1991). Seismic modeling of geologic structures. *Society of Exploration Geophysicists. Geophysical Development series* (2).
- Franco, R., Petracchini L., Scrocca D., Caielli, G., & Montegrossi, G. (2018). Synthetic seismic reflection modelling in a supercritical geothermal system: an image of the k-horizon in the Larderello Field (Italy). *Hindawi Geofluids* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/8492453>.
- Hardman, R. F. P., & Booth, J. E. (1991). The significance of normal fault in the exploration and production of North Sea hydrocarbons. *Special Publications*, 56(1). <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.056.01.01>.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel S., & Alford, R. M. (1976). Synthetic seismograms: A Finite-Difference Approach. *Geophysics*, 41(1), 2-27. <https://doi.org/10.1190/1.1440605>.

- Kjartansson, E., & Rocca, F. (1979). *The exploding reflector model and laterally variable media*. Stanford Exploration Project Report No. 16, Stanford University.
- Kosloff, D. D., & Baysal, E. (1982). Forward modeling by a fourier method. *Society of Exploration Geophysicists*, 47(10), 1402-1412.
- Loewenthal, D., Lu, L., Roberson, R., & Sherwood, J. (1976). The wave equation applied to migration. *Geophysical Prospecting*, 24(2), 380-399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1976.tb00934.x>
- Loewenthal, D. (1996). Huygens principle versus exploding reflector-theoretical and numerical aspects. *Exploration Geophysics*, 27(4), 183-186. <https://doi.org/10.1071/EG996183>.
- Marfurt, K. J. (1984). Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations. *Geophysics*, 49(5), 533-549. <https://doi.org/10.1190/1.1441689>.
- Margrave, G. (2003). Numerical methods of exploration seismology with algorithms in Matlab. <http://www.crewes.org/ResearchLinks/FreeSoftware/>.
- Moczo, P., Robertsson, O. J. A., & Eisner, L. (2007). The finite-difference time-domain method for modeling of seismic wave propagation. *Advances in Geophysics*, 48, 421-516. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(06\)48008-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(06)48008-0).
- Mohebian, R., Mohammad, A. R., & Yousefi, O. (2018). Detection of channel by seismic texture analysis using Grey Level Co-occurrence Matrix based attributes. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15, 1953-1962. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aac099>.
- Nejati, M., & Hashemi, H. (2012). Migrated Exploding Reflectors in Evaluation of Finite Difference Solution for Inhomogeneous Seismic Models. *Engineering*, (4), 950-957. <https://doi.org/10.4236/Eng.2012.412A120>.
- Sefünç, A. (2017). *Petrol aramaçılığında sismik yoruma giriş*, (1). Poyraz Ofset Matbaacılık.
- Shuxin, P., Huaqing, L., Carlos, Z., Caiyan, L., Sujuan, L., Qingshi, Z., & Zhongfeng, B. (2017). Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6), 911-922. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.412A120>.
- Zhu, W., & Huang, Q. (2015). Application of reverse time migration on GPR data for detecting internal structures in a sand dune. *Society of Exploration Geophysicists*, 2269-74. <https://doi.org/10.1190/segam2015-5833237.1>.
- Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas Propagation* 14(3), 302-7.
- Youzwishen, C. F., Margrave, G. F. 1999. *Finite difference modelling of acoustic waves in Matlab*. CREWES Research, Report No: 11.