

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Türkiye, sismotektonik özellikleri nedeniyle sıkça depremlere maruz kalmaktadır. Depremler litosferdeki süreksizlikler olan ve fay adı verilen kırıklar üzerinde biriken gerilim enerjisinin ani yer değiştirme ile açığa çıkan kabuk içindeki dalga yayınıdır. Depremler çoğunlukla gerilmenin sürekli biçimde biriktiği ve çok sayıda etkin fayın yer aldığı levha sınırları üzerinde ya da yakınında meydana gelir.

Depremler eski çağlardan beri insanoğlunu ve yaşadığı çevreyi etkileyen ve insanoğlu tarafından merak edilmiş doğal olaylardır (Ambraseys ve Finkel, 1995). Çünkü insanlar ve kurmuş oldukları medeniyetler geçmişten günümüze şiddetli depremler sonucu büyük can ve mal kayıplarına uğramıştır. Özellikle son yüzyıllarda ülkemizde ve dünyanın diğer yerlerinde yaşanan depremler ve bunun neticesinde meydana gelen can ve mal kayıpları dikkatleri deprem ve yarattığı etkiler konusuna çekmiştir. Geçen yüzyıl içinde artan şehirleşme ve endüstrileşme faaliyetleri ve küresel ölçekte Tokyo, İstanbul, Los Angeles ve San Fransisco gibi önemli yerleşim merkezlerinin önemli fay hatları civarında yer alması depremlerin bir afet olarak etkilerini daha da önemli hale getirmiştir (Kanamori ve ark., 1997). Bu nedenle insanoğlu depremlerin özelliklerini, oluş sebeplerini ve zararlarını azaltma yollarını araştırmaya ve gerekli önlemleri almaya her zamankinden daha fazla ihtiyaç duymaktadır.

Günümüzde depremler konusunda yapılan çalışmaların önemli bir bölümünü deprem kaynağının incelenmesi çalışmaları oluşturmaktadır (Lay ve Wallace, 1995). Hatta depremler hakkındaki bilgilerimizin büyük bir kısmı deprem kaynağının incelenmesi sayesinde ortaya konulmuştur denilebilir. Bir depremin kaynak özellikleri ne kadar iyi belirlenirse depremin hazırlanış ve oluş süreci o kadar iyi anlaşılabilir. Deprem olayında, faylar üzerindeki yer değiştirme ile serbestlenen enerji elastik dalgalar halinde yer kabuğu içinde yayılırlar. Sismograflarla kayıt edilen dalga şekilleri deprem kaynağı hakkında bize en iyi ve güvenilir bilgileri verir. Dolayısıyla bir depremin kayıt edilen dalga şekillerindeki her bir salınım deprem kaynağındaki veya

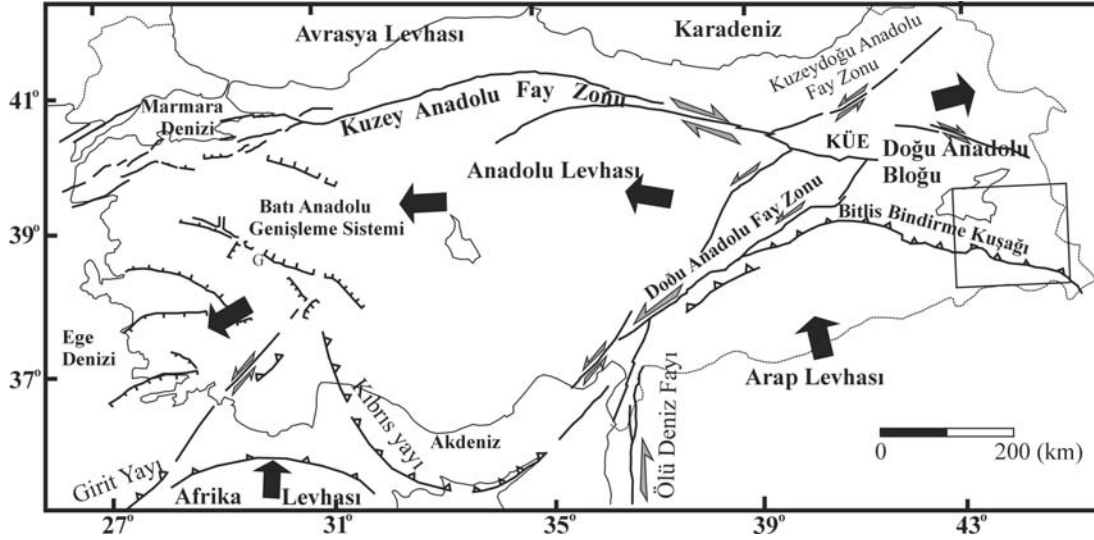
kaynaktan kayıt istasyonuna olan dalga yolundaki özellikleri yansıtır. Sismoloji'deki önemli araştırma alanlarından biri de dalga şekillerindeki bu salınımların anlamlarının veya bu salınımları oluşturacak faylanma ve yayılım yolu özelliklerinin bulunmasıdır.

Şimdiye kadar yapılan araştırmalardan dalga kayıtlarının biçimini etkileyen başlıca parametrelerin kaynak etkisi, yayılma etkisi ve alet etkisi olduğunu bilinmektedir (Lay ve Wallace, 1995). Bunların her birini matematiksel olarak modellemek ve bunlardan yapay olarak sismogram oluşturmak mümkündür. Matematiksel olarak hesaplanan dalga şekilleri sentetik (yapay) dalga şekilleri olarak adlandırılır. Yapılan modellemenin ne kadar iyi olduğunu veya güvenilirliğini anlamak için, bir depreme yönelik modellenmiş sentetik dalga şekilleri ile depremin gerçek kayıtlarını yani gözlenmiş dalga şekillerinin karşılaştırılmasına da dalga şekli modellemesi (waveform modelling) adı verilir. Dalga şekli modellemesi yerin içyapısını ve deprem kaynağını oluşturan faydaki kırılma sürecinin belirlenmesinde; sismoloji'de kullanılan çok güçlü tekniklerden biridir. Bu çalışmada da 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin ($M_w=5.9$) kaynak özellikleri, Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilmiş bir yöntem ile uzak-alan (telesismik) dalga şekli modellemesi yapılarak belirlenmeye çalışılacaktır. Modelleme sonucu elde edilecek kaynak parametreleri depremin meydana geldiği bölgenin sismotektonik özellikleri açısından yorumlanmaya çalışılacaktır.

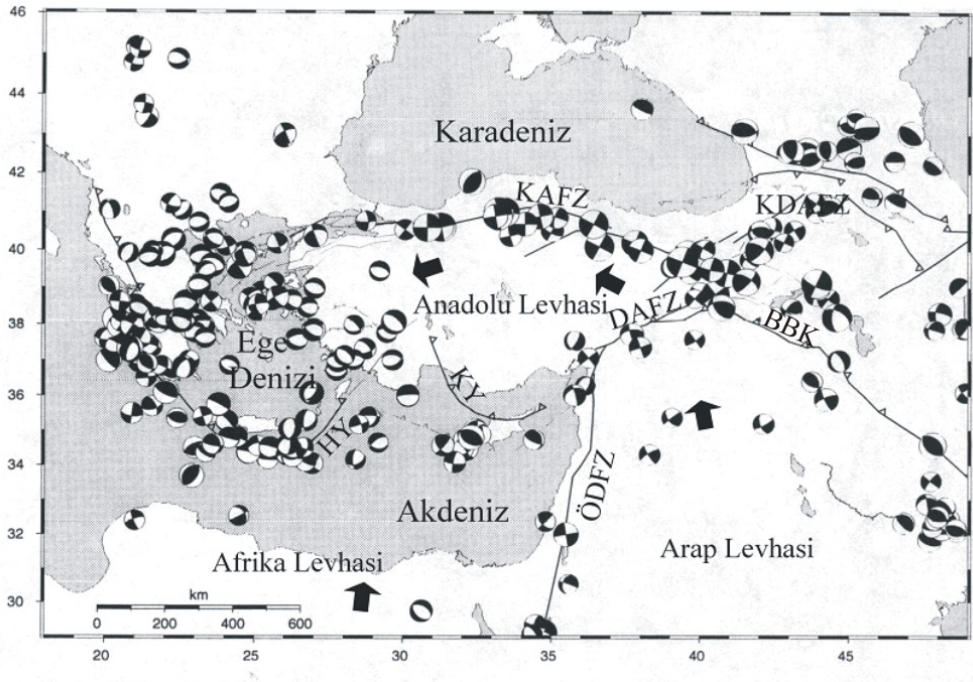
1.2. Türkiye'nin Sismotektonik Özellikleri

Bölgesel olarak Türkiye'nin sismotektoniği durağan Avrasya levhasına göre Arabistan ve Afrika levhalarının hareketinden etkilenmekte ve depremselliği de genel olarak bu levhaların hareketleri sonucunda oluşmaktadır (Şekil 1.1) (Şengör ve ark., 1985; Barka ve Kadisky-Cade, 1988; Barka ve Reilinger, 1997; McClusky ve ark., 2000; Reilinger ve ark., 2006). Arap levhasının kuzey yönündeki hareketi ile Bitlis-Zağros Bindirme Kuşağı boyunca Doğu Anadolu'da meydana gelen sıkışma sonucunda Anadolu Levhası Kuzey Anadolu (KAFZ) ve Doğu Anadolu (DAFZ) Fay Zonları boyunca batıya doğru hareket etmektedir. Batıya doğru bu hareket Batı Anadolu'da güneybatıya yönelmektedir. Aynı zamanda Afrika Levhası, Girit ve Kıbrıs

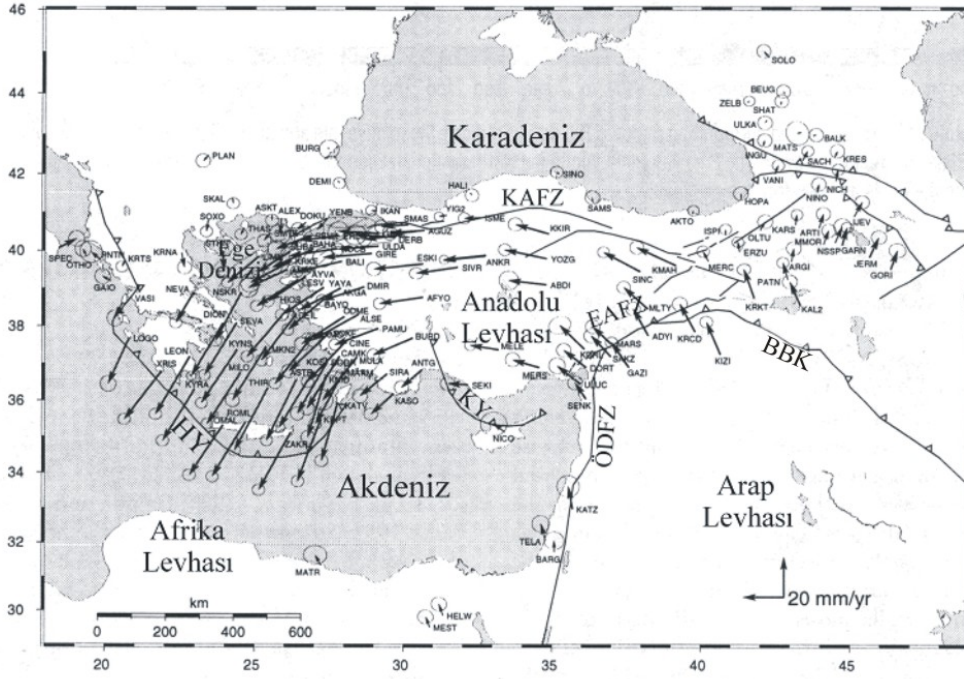
yayları boyunca Anadolu plakasının altına dalmaktadır. Tüm bu levha hareketleri deprem kaynak mekanizmaları (Şekil 1.2) (Toksöz ve ark., 1978; Eyidoğan, 1983; Jackson ve McKenzie, 1984; Taymaz ve ark., 1991; Pınar, 1995; Pınar, 1998) ve bölgesel ölçekte ayrıntılı Global Positioning System (GPS) çalışmaları ile doğrulanmıştır (Şekil 1.3) (McClusky ve ark., 2000; Reilinger ve ark., 2006).



Şekil 1.1. Türkiye'nin genel sismotektonik özelliklerini gösteren harita. Barka ve Kadinsky-Cade, (1988)'den değiştirilmiştir. KÜE: Karlova Üçlü Eklemleri.



Şekil 1.2. Türkiye ve yakın civarındaki depremlerin odak mekanizma çözümleri. Çözümleri Harvard CMT katalogundan alınmıştır. McClusky ve ark., (2000)'den değiştirilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye ve yakın civarında GPS hız vektörlerinin dağılımı. McClusky ve ark., (2000)'den değiştirilmiştir.

Doğu Anadolu Bloğu içinde yayılmış halde uzanan kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) doğrultulu sol-yanal ve kuzeybatı-güneydoğu (KB-GD) doğrultulu sağ-yanal faylar Türkiye'nin diğer bir önemli sismotektonik özelliğini oluşturur (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Şaroğlu ve ark., 1992; Koçyiğit ve ark., 2001). Karayazı Fay Zonu, Tutak Fay Zonu, Balık Gölü Fay Zonu, Doğubeyazıt Fay Zonu, Iğdır Fay Zonu, Erciş Fay Zonu ve Çaldıran Fay Zonları KB-GD uzanımlı sağ-yanal fay zonları için ve Horasan-Narman Fay Zonu, Kağızman Fay Zonu ve Erzurum Fay zonları KD-GB uzanımlı sol-yanal fay zonları için örnek olarak gösterilebilir (Şekilde yok).

Jackson (1992), Karlıova Üçlü Eklemleri (KÜE)'nin hemen doğusunda meydana gelen 19 Ağustos 1966 Varto ($M_S=6.8$) ve daha doğuda meydana gelen 24 Kasım 1976 Çaldıran ($M_S=7.3$) depremleri odak mekanizma çözümlerinden (Jackson ve McKenzie, 1984) yararlanarak sağ yanal hareketlerin KÜE doğusunda da KB-GD doğrultulu göreceli olarak küçük ve aralıklı fay segmentleriyle devam ettiğini ve İran'da Zagros bindirme kuşağının doğu kenarında yer alan sağ-yanal atımlı fay zonları ile birleştiğini öne sürmüştür. Jackson, (1992), KÜE'nin küçük aralıklı bu fayların aynı hat üzerinde bulunmamasının nedenini açıklayacak basit bir tektonik model de öne sürmüştür. McClusky ve ark., (2000), KÜE batısında KAFZ'nun hemen güneyinde KB yönelimli

olan GPS hız vektörleri KÜE'den itibaren dereceli olarak doğu yönüne dönmesini Doğu Anadolu Bloğu içinde dağılmış KD-GB doğrultulu sol-yanal ve KB-GD doğrultulu sağ-yanal atımlı faylanmaların bir kanıtı olduğunu ileri sürmüştür.

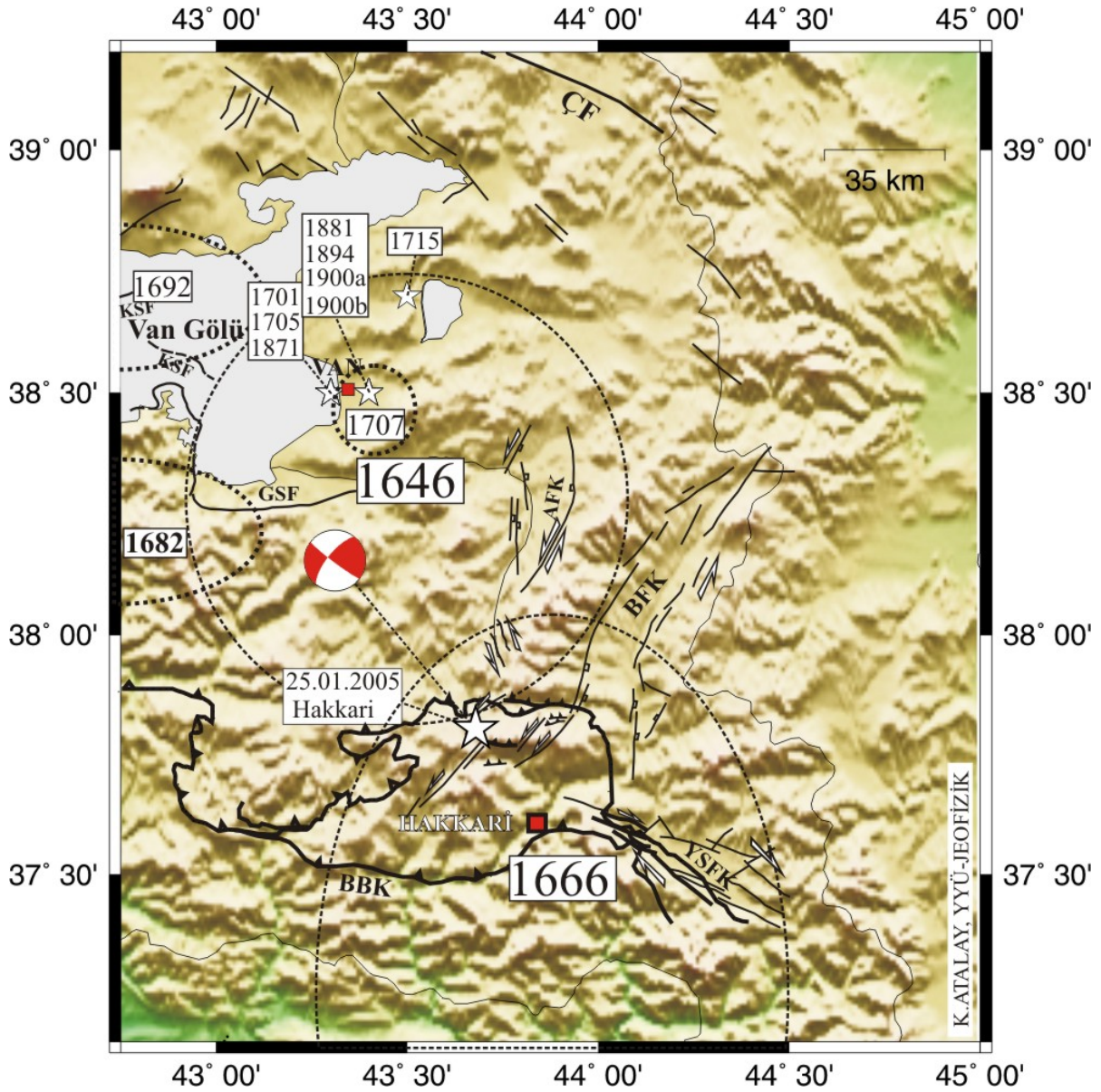
Güncel sayılabilecek kapsamlı bir araştırma projesinin sonuçları günümüzde Doğu Anadolu'da da esas olarak kaçma tektoniğinin hakim olduğunu önermiştir (Sandvol ve ark., 2003; Zor ve ark., 2003). Dolayısıyla Doğu Anadolu Bloğu içinde yayılmış halde uzanan sol-yanal ve sağ-yanal doğrultu atımlı faylar bu kaçma tektoniği sonucu oluşmuşlardır. Bu faylar güneyde Arap Levhası'nın çarpıp sıkıştırmasından kaynaklanan deformasyonu KD'da Küçük ve Büyük Kafkaslar deformasyon zonlarına iletmektedirler. Mevcut GPS çalışmaları da bunu doğrulamaktadır (McClusky ve ark., 2000; Reilinger ve ark., 2006).

1.3. Hakkari ve Van Yöresinin Sismotektonik Özellikleri

Hakkari ve Van yöresi, Türkiye'nin en sarp ve dağlık yörelerinden biridir. Bu durum bir kısmı yöre içinde uzanan Bitlis Bindirme Kuşağı (BBK) ile ilişkilidir (Şaroğlu ve ark., 1992; Koçyiğit ve ark., 2001). Yüksekova Şemdinli Fay Kuşağı (YŞFK) ve Başkale Fay Kuşağı (BFK) yörenin diğer önemli sismotektonik unsurlarıdır (Hull ve ark., 2002; Emre ve ark., 2005; Koçyiğit 2005) (Şekil 1.4).

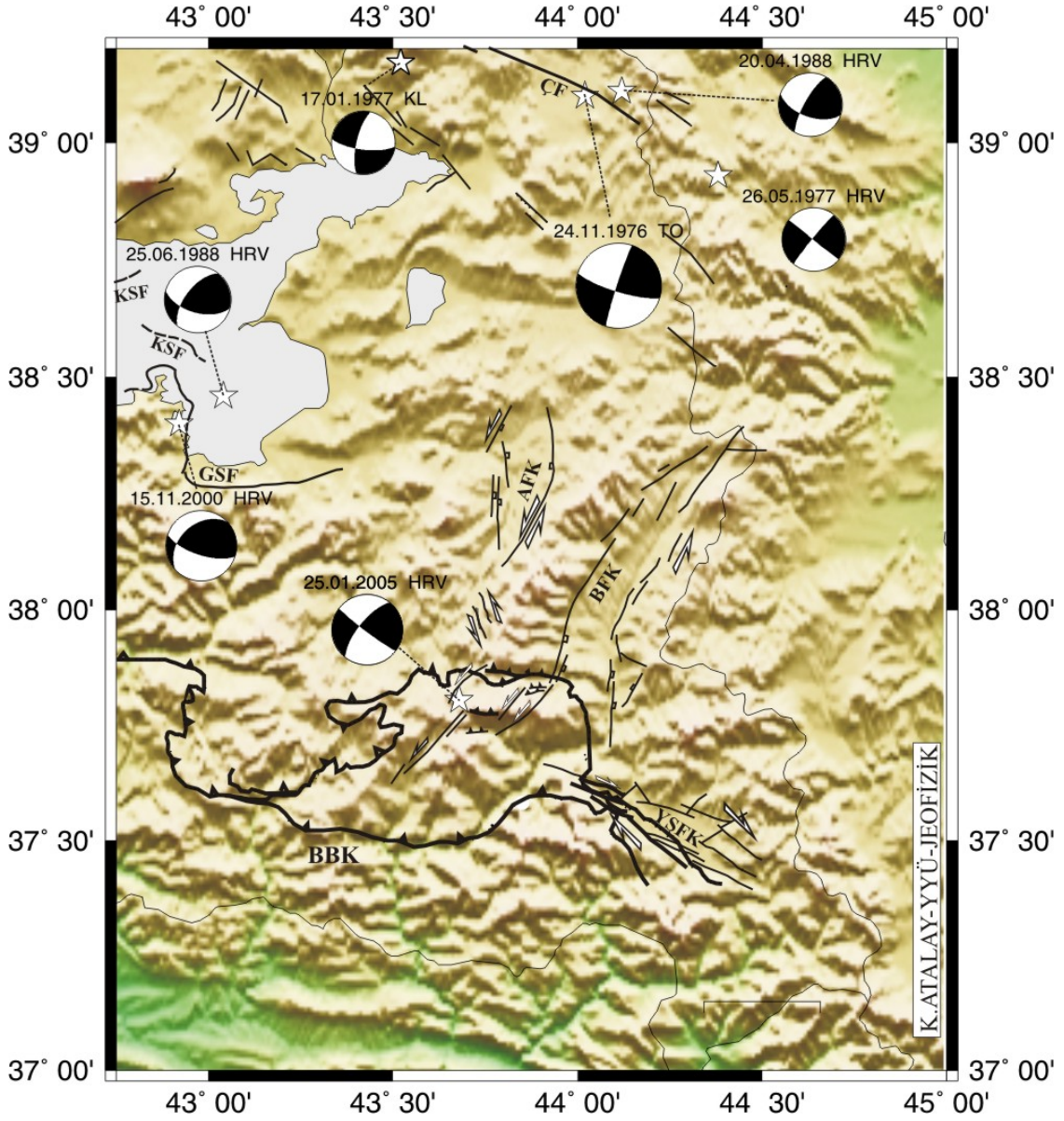
YŞFK yaklaşık 20 km genişlikte, 90 km uzunlukta, KB-GD doğrultulu sağ yönlü doğrultu-atımlı aktif bir makaslama kuşağı olup, kuzeybatıda Çığılsuyu ırmağından başlayıp güneydoğuya doğru Türkiye sınırları dışında da devam eder (Koçyiğit, 2005). Jeomorfolojik ötelenmeler sismik olarak aktif bu fay zonunun sağ yanal doğrultu atımlı olduğunu önermektedir (Emre ve ark., 2005). BFK yaklaşık 9-15 km genişlikte, 82 km uzunlukta, KD-GB doğrultulu sol yönlü doğrultu atımlı aktif bir fay zonu olup Hakkari'nin yakın güneybatısından İran sınırına kadar uzanır (Koçyiğit, 2005). 1908 Başkale depremi bu fayın sismik bakımdan aktif olduğunu önermektedir.

Bölgesel olarak Anadolu'nun tektoniği Arabistan ve Afrika levhalarının hareketinden etkilenmektedir Bölgenin depremselliği de genel olarak bu levhaların hareketi sonucunda oluşmaktadır. Çalışma alanında daha önce yapılmış olan odak mekanizması çözümleri genel olarak KB-GD doğrultulu düzlemler üzerinde ağırlıklı



Şekil 1.4. Hakkari ve Van yöresinin belli başlı sismotektonik unsurlarını (Degens ve ark., 1978; Şaroğlu ve ark., 1992; Koçyiğit 2005) ve yöre içinde tarihsel dönemde (1900 öncesi) meydana gelen depremlerin (küçük beyaz yıldızlar) makrosismik etki alanlarını (kesikli çizgili elipsler) gösteren harita. Tarihsel depremler Soysal ve ark., (1981) ve Ambraseys ve Finkel, (1995)'den alınmıştır. Büyük beyaz yıldız ve kırmızı beyaz top sırasıyla 2005 Hakkari depreminin dış merkezini ve odak mekanizma çözümünü (Harvard CMT) göstermektedir. BBK: Bitlis Bindirme Kuşağı, ÇF: Çaldıran Fayı, BFK: Başkale Fay Kuşağı, YŞFK: Yüksekova Şemdinli Fay Kuşağı, AFK: Arındı Fay Kuşağı, KSF: Kuzey Sınır Fayı, GSF: Güney Sınır Fayı.

olarak sağ yanal hareket önermektedir. (Şekil 1.5) Bu durum Doğu Anadolu Bloğu içinde uzanan KB-GD doğrultulu sağ yanal faylar (örnek olarak Çaldıran Fayı (ÇF), Tutak Fayı, Balık Gölü Fayı) ile uyumludur. BBK üzerinde meydana gelen 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin düğüm düzlemlerinden birinin de (KB-GD doğrultulu olan) sağ yanal faylanma önermesi Doğu Anadolu Bloğu içerisindeki sağ yanal fayların yer yer BBK'nıda kestiğini göstermektedir. (Şekil 1.5 ve 1.6).

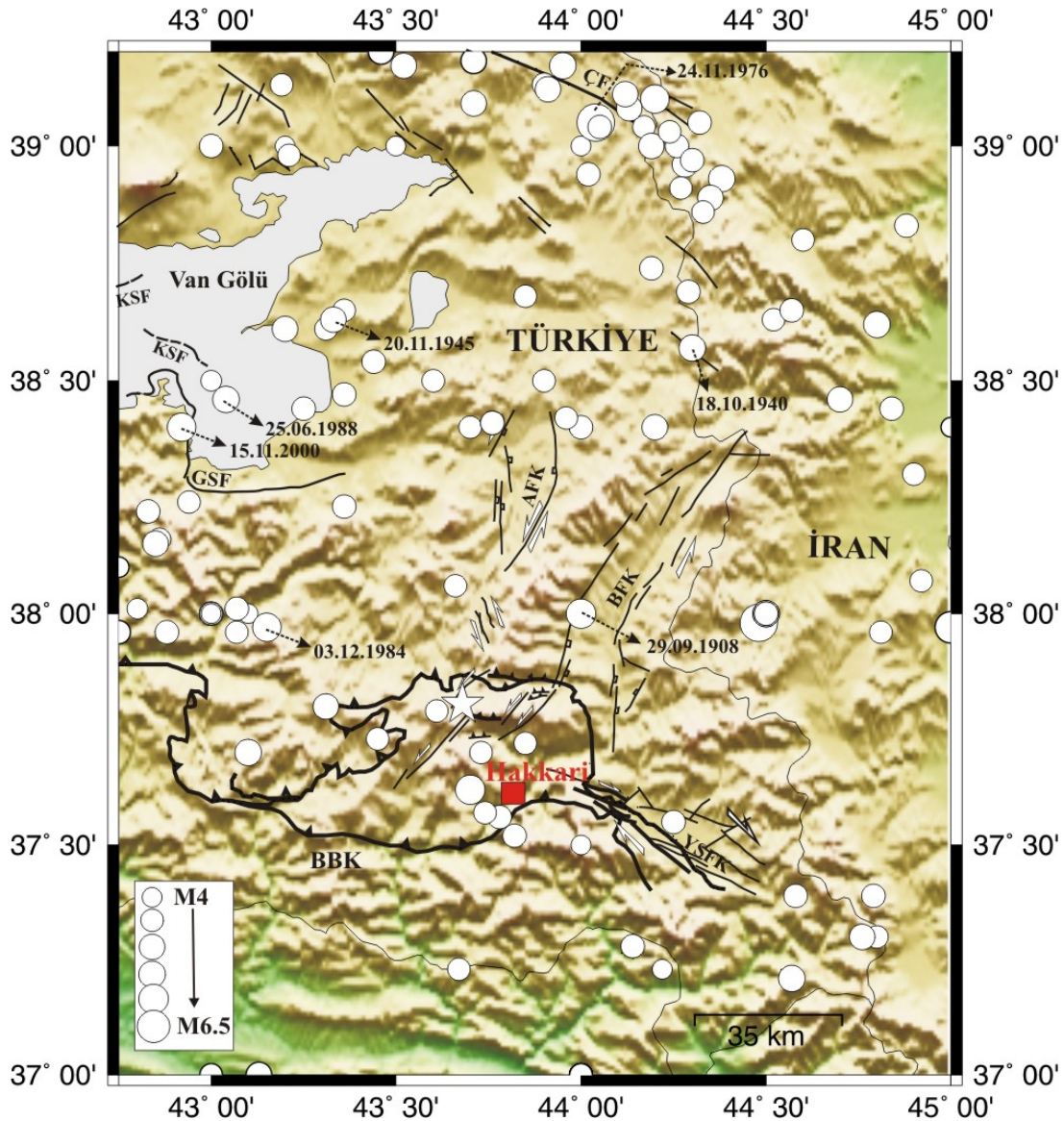


Şekil 1.5. Hakkari ve Van yöresinde meydana gelmiş ve odak mekanizma çözümleri (siyah beyaz toplar) bilinen depremleri (dış merkezler beyaz yıldızlar ile gösterilmiştir) gösteren harita. HRV: Harvard CMT, TO: Toksöz ve ark., (1978), KL: Kalafat, (1995). Diğer kısaltmalar için Şekil 1.4'ün alt yazısına bakınız.

1.4. Hakkari ve Van Yöresinin Depremselliği

Hakkari ve Van yöresi tarihsel dönemde (1900 yılı öncesi) aktif depremselliği ile göze çarpar (Şekil 1.4) (Soysal ve ark., 1981; Amraseys ve Finkel, 1995). Tarihsel dönemde yörede meydana gelen bilinen en önemli yıkıcı depremler 1646 Van ve 1666 Hakkari depremleridir. 1646 Van depremi özellikle Van Gölü doğusunda Van, Erçek, Gürpınar yerleşimlerinde hasara neden olmuştur (Amraseys ve Finkel, 1995). 1666 Hakkari depreminin makrosismik etki alanı 1646 Van depremine göre daha güneyde ve hatta bugünkü Irak'ın kuzeyine uzanmaktadır.

Yörede aletsel dönemde de aktif bir depremselliğin olduğu $M \geq 4$ depremselliğin gösterildiği Şekil 1.6'dan görülebilir (Çizelge 1.1) (Alsan ve ark., 1975, Ayhan ve ark., 1984). Kuzeyde ÇF üzerinde yoğunlaşan depremsellik güneyde BBK ve YŞFK üzerinde yoğunlaşmıştır. Yörede şiddetlice hissedilmiş ve hasara neden olmuş önemli depremler 1908 Başkale, 1940, 1945 Van, 1976 Çaldıran, 1984, 1988 ve 2000 Van ve 25 Ocak 2005 Hakkari depremleridir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Hakkari ve Van yöresinde aletsel dönemde (1900 yılı ve sonrası) meydana gelmiş ve Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) kataloglarından (Alsan ve ark., 1975; Ayhan ve ark., 1984) ve Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) katalogundan derlenmiş büyüklüğü $M \geq 4$ olan depremsellik. Beyaz yıldız 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin dış merkezini temsil etmekte olup $M \geq 5.5$ olan depremler etiketlenmiştir. Güneyde depremselliğin 2005 Hakkari depremi dış merkezi civarında BBK üzerinde yoğunlaştığına dikkat ediniz. Diğer kısaltmalar için Şekil 1.4'ün alt yazısına bakınız.

Çizelge 1.1 Hakkari ve Van yöresinde aletsel dönemde (1900 yılı ve sonrası) meydana gelmiş ve büyüklüğü $M \geq 4$ olan depremler

Deprem No	Tarih	Saat	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik	Mag.	Kaynak
1	29.09.1908	06:28	38,00	44,00	2	6,0	AY
2	28.02.1915	12:47	37,70	43,10	2	5,3	AY
3	25.07.1924	21:39	38,00	43,00	2	4,9	AY
			38,00	43,00		4,6	AL
4	16.04.1930	21:25	38,06	43,66	20	4,6	AL
5	06.05.1930	07:03	37,21	44,57	10	5,5	AY
			37,21	44,57	10	5,5	AL
6	06.05.1930	22:34	37,98	44,48	70	7,6	AY
			37,98	44,48	70	7,6	AL
7	07.05.1930	04:47	37,00	44,00		4,6	AL
8	07.05.1930	04:58	37,00	44,00		4,6	AL
9	07.05.1930	05:24	37,00	44,00		4,6	AL
10	07.05.1930	05:42	37,00	44,00		4,6	AL
11	07.05.1930	09:29	37,00	44,00		4,6	AL
			38,00	44,50		4,5	AY
12	07.05.1930	10:58	37,00	44,00		4,6	AL
13	07.05.1930	11:31	37,00	44,00		4,6	AL
14	07.05.1930	13:48	38,00	44,50		4,9	AY
15	08.05.1930	05:29	38,00	44,50		4,8	AY
16	08.05.1930	14:23	38,00	44,50		5,1	AY
17	08.05.1930	15:05	38,00	44,50		5,4	AY
18	08.05.1930	15:35	37,97	45,00	30	6,3	AL
			37,97	45,00	30	6,3	AY
19	08.05.1930	23:36	37,30	44,80	2	4,5	AY
20	09.05.1930	01:43	38,00	44,50		4,6	AY
			37,00	44,00		4,6	AL
21	09.05.1930	21:08	38,00	44,50		4,5	AY
22	10.05.1930	21:43	37,55	44,25	10	4,9	AY
			37,55	44,25	10	4,9	AL
23	10.05.1930	23:59	37,00	44,00		4,6	AL
24	21.05.1930	13:51	38,00	44,50		4,8	AY
		13:50	37,00	44,00		4,8	AL
25	23.05.1930	09:48	38,00	44,50		5,2	AY
26	29.05.1930	17:15	38,00	44,50		5,5	AY
27	09.07.1930	04:36	38,00	44,50		4,9	AY
			37,07	43,19	10	4,9	AL
28	03.08.1930	22:06	38,46	44,70	80	5,0	AY
			38,46	44,70	80	5,0	AL
29	21.08.1930	06:55	38,00	44,50		4,7	AY
			37,00	44,00		4,6	AL
30	24.12.1931	23:00	37,39	44,79	40	4,8	AY
			37,39	44,79	40	4,6	AL
31	06.11.1933	07:07	38,68	43,85	10	4,6	AL
32	07.03.1937	19:10	38,40	43,70	15	4,6	AY
33	17.03.1940	09:08	38,22	42,83	10	4,8	AY
			38,22	42,83	10	4,6	AL
34	15.01.1945	05:30	38,40	44,20	32	5,1	AY
35	21.07.1945	01:33	38,41	43,76	60	4,9	AY
36	29.07.1945	08:56	38,00	43,00	2	4,9	AY
37	23.09.1940	13:14	37,00	43,00		4,6	AL
38	18.10.1940	12:25	38,57	44,30	20	5,5	AL
39	28.10.1940	02:34	39,04	44,17	50	4,6	AL
40	21.07.1945	01:33	38,41	43,76	60	4,9	AL
41	29.07.1945	08:56	38,00	43,00		4,6	AL
42	20.11.1945	06:27	38,63	43,33	10	5,2	AY
			38,63	43,33	10	5,5	AL
43	19.04.1947	17:39	37,80	43,31	40	5,0	AY
			37,80	43,31	40	5,0	AL

(AL : Alsan ve ark., 1975, AY : Ayhan ve ark., 1984, USGS : Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu)

Çizelge 1.1 Hakkari ve Van yöresinde aletsel dönemde (1900 yılı ve sonrası) meydana gelmiş ve büyüklüğü $M \geq 4$ olan depremler (devam)

Deprem No	Tarih	Saat	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik	Mag.	Kaynak
44	15.03.1951	10:01	38,40	44,00	2	4,8	AY
			38,40	44,00		4,6	AL
45	15.03.1951	13:47	39,00	43,00	12	4,7	AY
46	30.09.1952	02:50	39,91	44,09	10	4,6	AY
			38,91	44,09		5,0	AL
47	01.02.1953	18:36	38,40	45,00		4,0	AL
48	14.02.1953	20:52	38,50	43,60	20	4,5	AY
			38,50	43,60		4,0	AL
49	09.01.1955	04:31	38,50	43,90	2	4,5	AY
			38,50	43,90		4,5	AL
50	27.07.1958	17:14	38,80	44,60	10	4,5	AY
51	26.10.1958	12:40	37,39	44,58	50	4,7	AY
			37,39	44,58		4,7	AL
52	29.01.1959	02:47	39,00	43,20		4,0	AL
53	20.03.1960	10:41	39,00	44,00		4,0	AL
54	03.04.1961	18:20	38,00	43,10		4,0	AL
55	19.04.1961	14:20	38,30	44,90	20	4,5	AY
56	04.09.1961	23:27	38,00	43,00		4,0	AL
57	19.04.1962	11:55	38,74	44,19	40	4,7	AY
			38,74	44,19		4,7	AL
58	19.08.1962	06:20	38,50	43,00		4,2	AL
59	14.10.1962	14:03	37,23	44,22	10	4,0	AL
60	05.06.1964	00:11	39,13	43,19	42	4,6	AL
			39,13	43,19		4,6	AY
61	29.11.1964	14:55	39,00	43,50		4,0	AL
62	09.12.1965	19:28	37,50	44,00	4	4,0	AL
63	02.05.1966	20:40	38,10	42,75	49	4,2	AL
64	03.05.1966	20:34	38,01	42,80	76	4,1	AL
65	14.06.1966	02:45	38,16	42,86	39	4,4	AL
66	17.05.1967	04:28	38,69	44,29	54	4,7	AY
			38,69	44,29		4,7	AL
67	11.06.1968	06:09	38,15	42,85	53	5,1	AY
			38,15	42,85		43	5,1
68	10.08.1968	04:28	37,00	43,13	42	5,1	AY
			37,00	43,13		42	5,1
69	17.02.1970	02:59	38,65	43,36	47	4,6	AY
			38,65	43,36		47	4,6
70	14.03.1970	01:51	38,62	44,80	50	5,3	AY
			38,62	44,80		50	5,3
71	16.07.1972	02:46	38,23	43,36	46	4,8	AY
72	30.08.1973	07:36	37,96	42,75	45	4,7	AY
			38,03	42,70		33	4,8
73	05.11.1973	20:12	38,01	43,07	69	4,7	AY
			37,94	42,81		47	4,7
74	12.03.1974	06:53	38,42	43,96	40	4,5	AY
			38,40	44,02		50	4,5
75	12.01.1976	22:41	38,61	43,20	56	5,0	AY
			38,59	43,13		36	5,0
76	24.11.1976	12:22	39,05	44,04	10	7,5	AY
			39,12	44,03		36	7,3
77	24.11.1976	12:30	39,17	43,95	33	5,3	AY
			39,12	43,92		33	5,0
78	24.11.1976	12:36	39,10	44,20	63	5,8	AY
			39,09	43,71		49	5,0
79	24.11.1976	13:18	39,07	43,67	33	4,8	USGS
			39,18	43,71		46	5,0
80	24.11.1976	15:04	39,16	43,71	41	4,9	USGS
			39,08	44,13		55	5,0
81	24.11.1976	20:46	39,08	44,13	55	5,0	AY
			39,08	44,04		46	4,8

(AL : Alsan ve ark., 1975, AY : Ayhan ve ark., 1984, USGS : Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu)

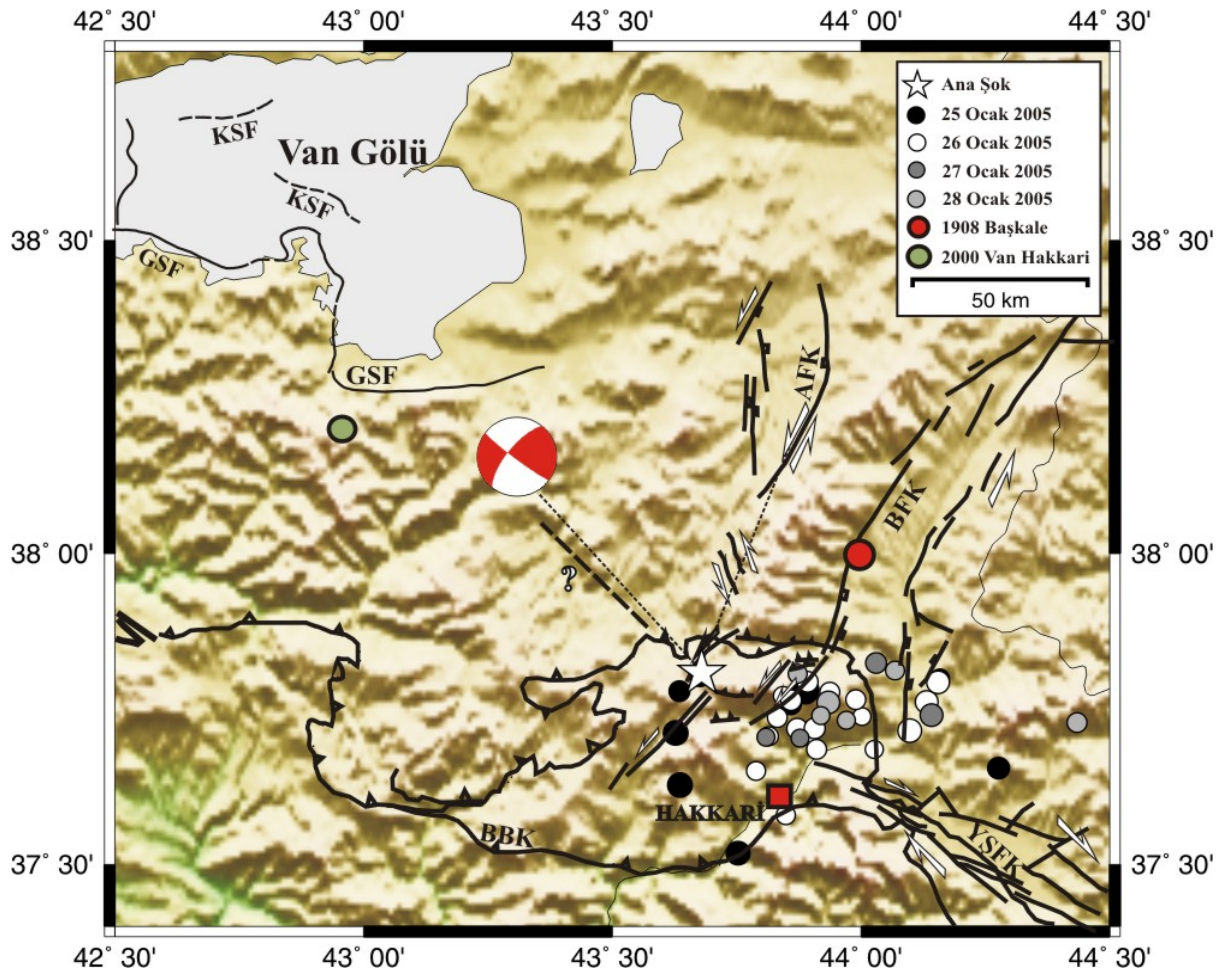
Çizelge 1.1 Hakkari ve Van yöresinde aletsel dönemde (1900 yılı ve sonrası) meydana gelmiş ve büyüklüğü $M \geq 4$ olan depremler (devam)

Deprem No	Tarih	Saat	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik	Mag.	Kaynak
82	25.11.1976	09:49	38,96	44,28	38	5,1	AY
			39,03	44,29	34	5,0	USGS
83	12.12.1976	07:54	39,00	44,26	41	4,9	AY
			38,99	44,24	40	4,8	USGS
84	25.12.1976	22:19	38,97	44,30	47	4,7	AY
			39,03	44,33	33	4,5	USGS
85	01.01.1977	22:26	39,20	43,46	24	5,0	USGS
			39,17	43,52	33	5,0	USGS
86	17.01.1977	05:19	39,17	43,52	33	5,0	USGS
			38,94	44,02	36	4,7	USGS
87	04.02.1977	20:47	38,94	44,02	36	4,7	USGS
			38,93	44,38	38	5,4	AY
88	26.05.1977	01:35	38,93	44,38	38	5,4	AY
			38,93	44,38	37	5,4	USGS
89	26.05.1977	09:50	38,89	44,35	40	5,0	AY
			38,96	44,38	41	4,8	USGS
90	30.05.1977	03:42	39,05	44,32	57	4,9	USGS
			38,91	44,27	36	4,6	USGS
91	15.09.1977	15:19	39,13	43,90	34	4,7	AY
			39,13	43,90	33	4,7	USGS
92	11.04.1979	12:14	39,12	43,91	44	5,0	AY
			39,11	43,90	34	5,0	USGS
93	04.01.1981	07:19	38,44	44,84	33	4,7	USGS
			37,21	42,56	10	4,7	USGS
94	01.01.1982	19:30	37,21	42,56	10	4,7	USGS
			39,00	42,07	10	4,6	USGS
95	23.03.1982	09:56	39,00	42,07	10	4,6	USGS
			38,86	44,33	33	4,5	USGS
96	26.03.1983	10:51	38,86	44,33	33	4,5	USGS
			37,23	43,67	10	4,6	USGS
97	03.10.1983	11:15	37,23	43,67	10	4,6	USGS
			38,98	43,21	10	4,6	USGS
98	07.03.1984	23:29	38,98	43,21	10	4,6	USGS
			37,97	43,15	35	5,7	USGS
99	03.12.1984	07:38	37,97	43,15	35	5,7	USGS
			37,96	43,07	42	4,6	USGS
100	27.02.1985	16:34	37,96	43,07	42	4,6	USGS
			38,54	43,44	43	4,7	USGS
101	10.08.1986	17:47	38,54	43,44	43	4,7	USGS
			37,96	42,88	33	4,7	USGS
102	07.12.1987	00:07	37,96	42,88	33	4,7	USGS
			39,11	44,12	55	5,0	USGS
103	20.04.1988	03:50	39,11	44,12	55	5,0	USGS
			39,04	44,05	47	4,7	USGS
104	21.04.1988	10:01	39,04	44,05	47	4,7	USGS
			38,46	43,04	50	5,3	USGS
105	25.06.1988	16:15	38,46	43,04	50	5,3	USGS
			37,96	44,81	33	4,5	USGS
106	16.10.1988	23:35	37,96	44,81	33	4,5	USGS
			37,18	42,60	16	4,7	USGS
107	30.01.1991	19:42	37,18	42,60	16	4,7	USGS
			37,28	42,57	10	4,7	USGS
108	02.02.1991	06:54	37,28	42,57	10	4,7	USGS
			37,11	42,60	33	4,8	USGS
109	02.02.1991	09:09	37,11	42,60	33	4,8	USGS
			37,77	42,72	18	4,7	USGS
110	14.02.1995	11:13	37,77	42,72	18	4,7	USGS
			39,03	44,24	33	4,5	USGS
111	02.10.1997	01:06	39,03	44,24	33	4,5	USGS
			38,47	43,36	44	4,7	USGS
112	12.10.1997	05:06	38,47	43,36	44	4,7	USGS
			38,81	42,41	33	4,8	USGS
113	03.11.1997	08:07	38,81	42,41	33	4,8	USGS
			37,73	43,45	10	4,6	USGS
114	07.08.1998	01:36	37,73	43,45	10	4,6	USGS
			38,63	44,52	66	4,5	USGS
115	19.02.1999	18:00	38,63	44,52	66	4,5	USGS
			37,30	44,76	33	5,2	USGS
116	26.02.2000	08:18	37,30	44,76	33	5,2	USGS
			38,40	42,92	65	5,6	USGS
117	15.11.2000	15:05	38,40	42,92	65	5,6	USGS
			38,24	42,94	33	4,6	USGS
118	17.11.2000	00:28	38,24	42,94	33	4,6	USGS
			38,44	43,25	33	4,7	USGS
119	02.12.2001	04:11	38,44	43,25	33	4,7	USGS
			37,28	44,14	37	4,9	USGS
120	28.02.2002	00:46	37,28	44,14	37	4,9	USGS
			38,83	44,88	33	4,7	USGS
121	11.08.2003	20:12	38,83	44,88	33	4,7	USGS
			38,65	44,57	10	4,8	USGS
122	20.10.2003	06:26	38,65	44,57	10	4,8	USGS
			37,52	42,66	10	4,8	USGS
123	23.10.2003	17:24	37,52	42,66	10	4,8	USGS
			38,07	44,92	46	4,6	USGS
124	24.01.2004	04:40	38,07	44,92	46	4,6	USGS
			38,61	43,31	12	4,6	USGS
125	26.09.2004	21:03	38,61	43,31	12	4,6	USGS
			37,56	43,78	19	4,8	USGS
126	25.01.2005	15:24	37,56	43,78	19	4,8	USGS
			37,70	43,73	34	4,6	USGS
127	25.01.2005	16:32	37,70	43,73	34	4,6	USGS
			37,62	43,70	41	5,9	USGS
128	25.01.2005	16:44	37,62	43,70	41	5,9	USGS
			37,79	43,61	11	4,6	USGS
129	25.01.2005	17:52	37,79	43,61	11	4,6	USGS
			37,72	43,85	10	4,5	USGS
130	02.02.2005	23:26	37,72	43,85	10	4,5	USGS
			37,57	43,74	9	4,6	USGS
131	04.02.2005	00:19	37,57	43,74	9	4,6	USGS
			37,52	43,82	10	4,7	USGS
132	05.06.2005	03:44	37,52	43,82	10	4,7	USGS

(AL : Alsan ve ark., 1975, AY : Ayhan ve ark., 1984, USGS : Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu)

1.5. 25 Ocak 2005 Hakkari Depremi

Güneydoğu Türkiye’de Türkiye, İran ve Irak sınırının birleştiği noktanın kuzeybatısında ve BBK içinde 25 Ocak 2005 tarihinde saat 18:44’de meydana gelmiş orta büyüklükte ($M_w=5,9$) bir depremdir (Emre ve ark., 2005; Koçyiğit, 2005). Bu deprem özellikle Hakkari ilinde etkili olmakla birlikte; Van, Başkale ve çevresinde şiddetlice hissedilmiştir. Depreminin dış merkez bölgesi Hakkari ilinin yaklaşık 25 km kuzeybatısında yer almakta olup BBK üzerindedir. Deprem sonucunda 2 kişi ölmüş, 26 kişi yaralanmış ve bazı binalarda hasar meydana gelmiştir. Depremin öncesinde saat 17:24’de büyüklüğü $M_d=4.8$ ve 18:32’de de $M_d=4.4$ olan öncü deprem sayılabilecek 2 deprem ve sonrasında da birçok artçı deprem meydana gelmiştir. Bunlardan 28 Ocak 2005 tarihine kadar meydana gelen ve dış merkezleri KRDAE web sayfasında verilen artçı depremler Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. KRDAE tarafından belirlenmiş 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin (beyaz yıldız) ve belirtilen günlerde meydana gelmiş artçı depremlerinin dış merkezlerini ve Harvard Üniversitesi (HRV) tarafından belirlenmiş odak mekanizması çözümünü (kırmızı beyaz top) gösteren harita. Referanslar ve kısaltmalar için Şekil 1.4’ün alt yazısına bakınız.

2005 Hakkari depreminin KRDAE, USGS, HRV, Doğu Akdeniz Sismoloji Merkezi (EMSC) ve İsviçre Zürih Teknoloji Enstitüsü (ETHZ) gibi ulusal ve uluslararası deprem enstitüleri ve araştırma kurumlarınca belirlenen odak ve kaynak parametreleri Çizelge 1.2 ve Çizelge 1.3'de listelenmiştir.

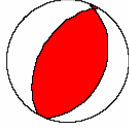
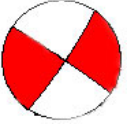
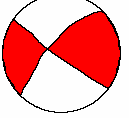
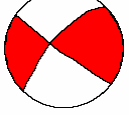
Çizelge 1.2. 25 Ocak 2005 Hakkari depremi odak parametreleri.

Kaynak ¹	Tarih	Saat	Koordinat		Derinlik (km)	Büyüklik			
			Enlem (K)	Boylam (D)		M _w	M _d	M _s	m _b
KRDAE	25.01.2005	18:44:09	37.75	43.79	16		5.5		
USGS		18:44:16	37.62	43.70	14	5.8			5,3
EMSC		18:44:09	37.50	43.80	10				5.4
ETHZ		18:44:09	37.30	43.20	24			5.6	
HRV ²		18:44:17	37.71	43.77	13.7	5.9			

¹ KRDAE: Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, USGS: Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu, EMSC: Doğu Akdeniz Sismoloji Merkezi, ETHZ: İsviçre Zürih Teknoloji Enstitüsü, HRV: Harvard Üniversitesi.

² Centroid Moment Tensor (CMT) lokasyonu.

Çizelge 1.3. 25 Ocak 2005 Hakkari depremi için bazı uluslararası merkez ve araştırmacıların vermiş olduğu kaynak mekanizması çözümleri. DD: Düşüm düzlemi.

Kaynak ¹	Büyüklik	Derinlik(km)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Kayma (°)	
KRDAE	M _d =5.5	16	DD1: 209.41 DD2: 23.73	DD1: 51.64 DD2: 38.49	DD1: 93.53 DD2: 85.56	
ETHZ	M _w =6.04	24	DD1 : 304 DD2 : 34	DD1 : 88 DD2 : 85	DD1 : 175 DD2 : 2	
USGS	M _w =5.8	14	DD1: 219 DD2: 127	DD1: 70 DD2: 85	DD1: 5 DD2: 160	
HRV	M _w =5.9	13.7	DD1: 208 DD2: 300	DD1: 73 DD2: 82	DD1: -8 DD2: 162	

¹ KRDAE: Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, USGS: Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu, EMSC: Doğu Akdeniz Sismoloji Merkezi, ETHZ: İsviçre Zürih Teknoloji Enstitüsü, HRV: Harvard Üniversitesi.

2. MATERİYAL ve YÖNTEM

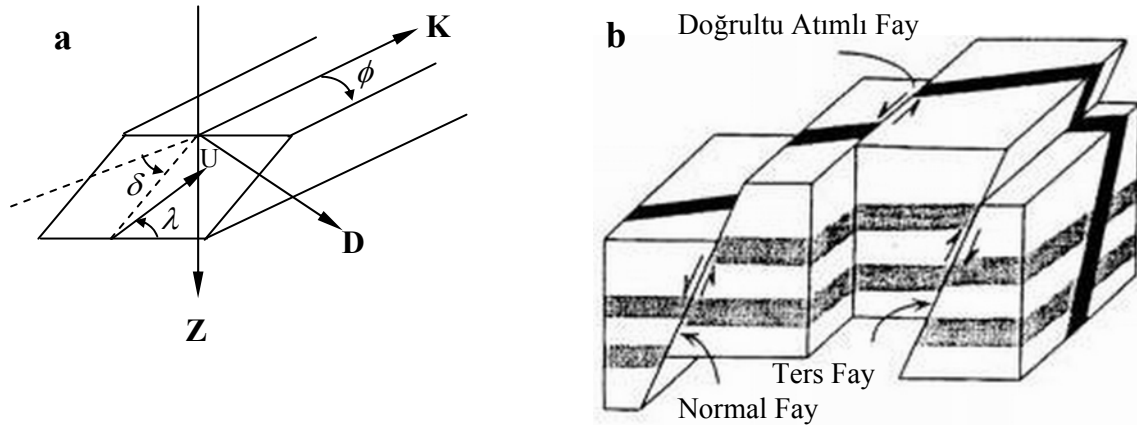
2.1. Deprem Kaynağı

Sismoloji’de deprem olayının kaynağını faylar üzerinde meydana gelen kırılma oluşturmaktadır. Sismoloji’de dalga şekli modellenmesi yapılırken bir fay, doğrultusu (ϕ), eğimi (δ), kayma vektörü açısı (λ) ile tanımlanır (Şekil 2.1).

Doğrultu (strike): Fayın yüzey izinin kuzeyle saat yönünde yaptığı açıdır ve ($0^\circ - 360^\circ$) arasında değişir.

Eğim (dip): Fay düzleminin Kayma yüzeyinin yatay ile yaptığı açıdır ve $0^\circ - 90^\circ$ arasında değişir.

Kayma vektörü (slip vektör): Faylanma sırasında fayın tavan bloğunun taban bloğuna göre göreceli hareketinin yön ve büyüklüğünü (yer değiştirme) ifade eder. Kayma vektörü açısı fay düzlemi üzerinde fayın doğrultusundan itibaren ölçülür ve rake açısı olarak da ifade edilir. Kayma açısı 180° ile -180° arasında değişir. 0° sol-yanal, $\pm 180^\circ$ sağ-yanal, -90° normal ve $+90^\circ$ ters faylanmaya karşılık gelir. Eksi değerler normal faylanma bileşeninin, artı değerler ters faylanma bileşeninin varlığını gösterir.



Şekil 2.1. (a) Sismik kaynak bileşenleri, doğrultu (ϕ), eğim (δ), atım veya kayma yönü (λ), U yer değiştirme (Lay ve Wallace, 1995); (b) farklı kayma yönlerine göre faylanma tiplerine örnekler (Stein ve Wysession, 2003).

2.2. Yer Değiştirme

Yer içindeki her hangi bir x_0 noktasına t_0 zamanında bir f birim kuvvetinin ($F(x_0, t_0)$) etkisinde her bir tanecik dt gibi bir zaman aralığında konum değiştirerek, x gibi bir noktaya taşınması yer değiştirme olarak tanımlanır (Aki ve Richards 1980; Lay ve Wallace 1995; Shearer, 1999). x_0 noktasında $F(x_0, t_0)$ kuvvetinden dolayı herhangi bir uzaklık ve azimuttaki yer değiştirme Green fonksiyonları ile tanımlanır. Herhangi bir gözlem noktasında ve zamanda yer değiştirmenin i bileşeni $U_i(x, t)$ (2.1) formülü ile ifade edilir. G , Green fonksiyonlarını ifade eder.

$$U_i(x, t) = G_{ij}(x, t; x_0, t_0) f_j(x_0, t_0) \quad (2.1)$$

2.3. Sismik Moment Tensör

Sismik moment tensör Şekil 2.2'de gösterildiği gibi dokuz ayrı kuvvet çiftinden oluşmuştur. Bu kuvvet çiftleri matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Sismik moment, katısalılık (rijidite) modülü (μ), faylanma alanı (A) ve yerdeğiştirme (U) miktarına bağlı olarak

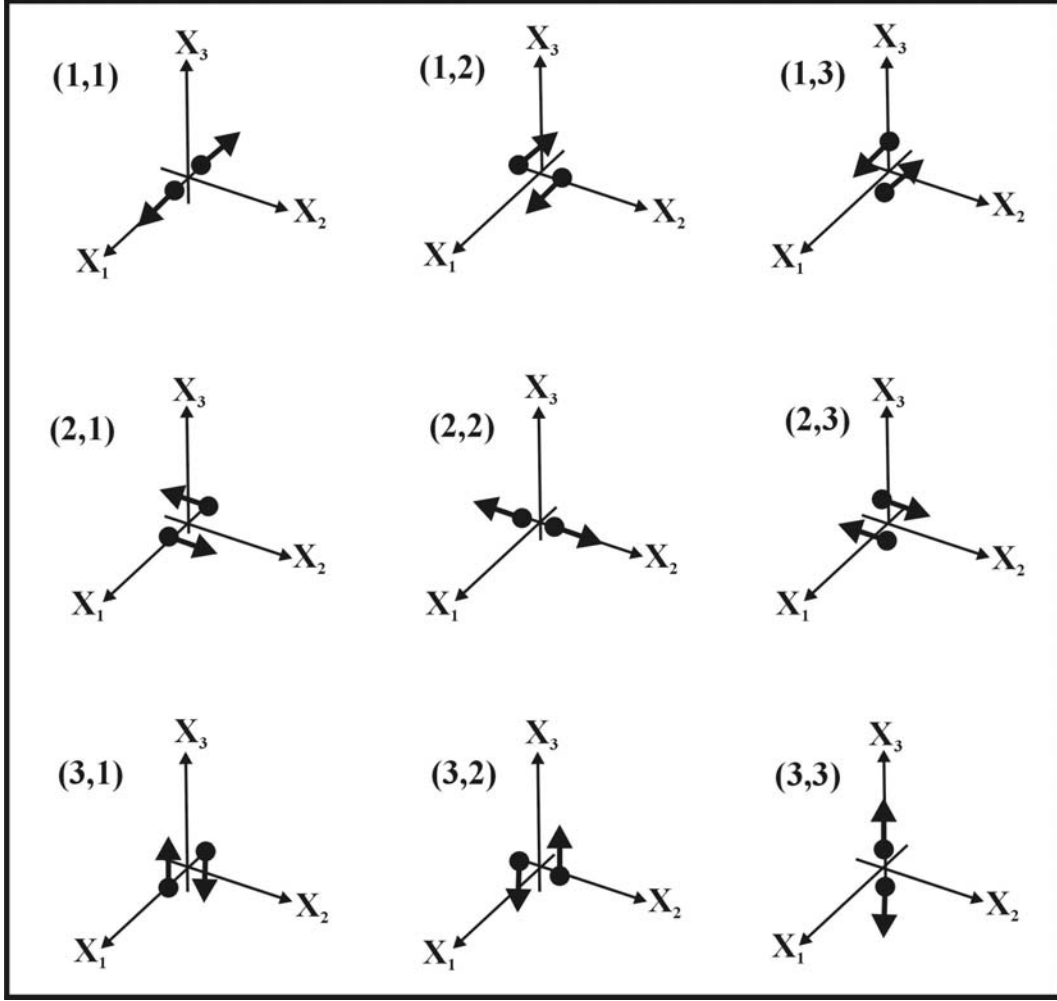
$$M_0 = \mu UA \quad (2.3)$$

şeklinde skalar bir büyüklük olarak tanımlanır (Aki ve Richards, 1980; Sheraer, 1999).

Dipol çift için (2.2) eşitliği, M_0 skaler moment olmak üzere aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$M = M_0 \begin{bmatrix} 0 & M_{12} & 0 \\ M_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Tensörlerin genel özelliklerine bağlı olarak, sismik moment tensör de simetriktir. Bu nedenle (2.2) denkleminde M_{11} , M_{22} , M_{33} , M_{12} , M_{13} , M_{23} bileşenlerinin belirlenmesi çözüm için yeterlidir.



Şekil 2.2. Sismik moment tensörünü oluşturan dokuz olası kuvvet çifti (Lay ve Wallace, 1995; Aki ve Richards, 1980).

Şekil 2.1.a'da verilen parametrizasyon kullanılarak coğrafi koordinatlara bağlı moment tensör bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilir (Lay ve Wallace, 1995).

$$\begin{aligned}
 m_1 = M_{11} &= -M_o [\sin(\delta) \cos(\lambda) \sin(2\phi) + \sin(2\delta) \sin(\lambda) \sin^2(2\phi)] \\
 m_2 = M_{12} &= M_o [\sin(\delta) \cos(\lambda) \cos(2\phi) + 0.5 \sin(2\delta) \sin(\lambda) \sin(2\phi)] \\
 m_3 = M_{13} &= -M_o [\cos(\delta) \cos(\lambda) \cos(\phi) + \cos(2\delta) \sin(\lambda) \sin(\phi)] \\
 m_4 = M_{22} &= M_o [\sin(\delta) \cos(\lambda) \sin(2\phi) - \sin(2\delta) \sin(\lambda) \cos^2(\phi)] \\
 m_5 = M_{23} &= -M_o [\cos(\delta) \cos(\lambda) \sin(\phi) - \cos(2\delta) \sin(\lambda) \cos(\phi)] \\
 m_6 = M_{33} &= M_o [\sin(2\delta) \sin(\lambda)] = -(M_{11} + M_{22})
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

(2.5) eşitliklerinde verilen bileşenlerden ilk beş tanesi P, SV veya SH dalga yer değiştirmelerini tanımlarken, altıncı bileşen patlatma türü bir kaynağı tanımlar. P ve S dalgaları için moment tensörü ilk beş bileşenin toplamı ile verilir.

$$M = \sum_{i=1}^5 m_i \quad (2.6)$$

Deprem sonrası yer değiştirme (U) ve G_{in} her bir moment tensör bileşenine karşılık gelen Green fonksiyonları olmak üzere herhangi bir konum ve zamanda yerdeğiştirmenin “n” bileşeni aşağıdaki şekilde ifade edilir (2.7). Bu şekilde birim bir kuvvet için yerdeğiştirmeyi ifade eden (2.1) denklemi moment tensörü olarak ifade edilir.

$$U_n(x,t) = \sum_{i=1}^5 m_i * G_{in} \quad (2.7)$$

2.3.1. Deviatorik moment tensör

Yerin derinlerinde kayaların üzerine binen ağırlıklar dolayısı ile geniş sıkışma gerilimleri (stress) meydana gelir. Bir çok uygulamalarda tüm sıkışma gerilimlerinin etkisinin kaldırılması ve bu etkiden sadece sapmanın hesaba katılması uygundur. Böylece başlıca gerilim aşağıdaki gibi belirtilir (Stein ve Wysession, 2003).

$$M = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) / 3 = \sigma_{ii} / 3 \quad (2.8)$$

Normal gerilimlerin toplamının 1/3 olarak, gerilim tensörlerinin izidir. Ana gerilim, çapraz gerilim tensörlerinin izinin terimlerinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (2.9)$$

Deviatoric stress tensörü, başlıca gerilim tensörlerin etkisinin çıkarılması ile tanımlanır,

$$D_{ij} = \sigma_{ij} - M\delta_{ij}$$

$$D = \begin{pmatrix} \sigma_{11} - M & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - M & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - M \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Böylece, ana gerilimler geniş ve yakın eşit olduğunda, deviatoric stress tensor etkileri çıkarılır ve gerilim durumunun kalktığını belirtir. Deviatoric stress tensor çapraz olabilir ve aynı baş gerilim düzlemi, gerilim tensoru gibi olur (Stein ve Wysession, 2003).

Bu genel kavram, yer ile ilgili tartışmalarda önemlidir, çünkü deviatoric stress, tektonik etkiler ve deprem faylanmalarının nedeni ve sismik dalga yayılımlarının sonuçlarıdır (Stein ve Wysession, 2003).

2.4. Zaman Ortamında Çözümleme

Kullanılan yöntem ilk olarak Kikuchi ve Kanamori (1982) tarafından basit tek alt olaylı (subevent) ve karmaşık (complex) ya da birden fazla alt olaylı depremlerin kaynak parametrelerinin elde edilmesi amacı ile geliştirilmiş bir nokta-kaynak ters çözüm yöntemidir. Dolayısıyla tek alt olayla modellenemeyen karmaşık cisim dalgalarının modellenmesinde kullanılmıştır (Kikuchi ve Fukao, 1985; Kikuchi ve Kanamori, 1991; Pınar, 1995; Pınar, 1998). Karmaşık deprem dalgaları farklı geometri, derinlik ve kaynak-zaman fonksiyonlu faylanmalardan (alt olaylardan) kaynaklanan elastik dalgaların bir süper pozisyonu olarak varsayılmaktadır. Alt olayların konumları, mekanizmaları ve büyüklükleri ters çözümleme sonucunda gözlemsel ve hesaplanan (sentetik) sismogramlar arasındaki uyum sağlanarak belirlenir.

Çizelge 2.1. Dipol çifti tanımlayan moment tensörler ve karşılık gelen kaynaklar (Kikuchi ve Kanamori, 1991).

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_5 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & M_6 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından daha da geliştirilen yöntemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Genellikle sismik moment $[M_{ij}]$, sismik moment tensörün 6 bağımsız elemanının bir bileşenidir. Ek sınırla birlikte $[M_{ij}]$ nin belirginliği sıfırdır, yok olan izin bir kısıtlaması ile bir pure – deviatoric moment tensor elde edilir ve momentin sıfır olması ile moment tensor ikili kuvvet çifti azalır. Bir sismik kaynağı gösteren 6 elemanlı

moment tensor Çizelge 2.1'deki gibi verilmiştir. Aki ve Richards (1980), genel bir moment tensörün bağımsız elemanlar tarafından nasıl belirtildiğini detaylı olarak açıklamıştır.

Burada x, y, z (M_{ij}) moment tensorünün koordinatları, sırası ile kuzey, doğu ve düşeye uygun gelmektedir (Bkz. Şekil 2.2). Herhangi bir moment tensor M_n ' in lineer bir kombinasyonu olarak gösterilebilmektedir.

$w_{jn}(t;p)$, nci başlangıç tensoru M_n e göre j istasyonda hesaplanan sismogram olur; burada p başlangıç zamanını gösteren bir parametredir, diğerleri de kaynak parametreleridir. M_n için an katsayısı gözlemsel sismogramdan $x_j(t)$ elde edilebilir.

$$\Delta = \sum_{J=1}^{N_s} \int \left[x_j(t) - \sum_{n=1}^{N_b} a_n w_{jn}(t;p) \right]^2 dt \quad (2.11)$$

$$\Delta = R_x - 2 \sum_{n=1}^{N_b} a_n G_n + \sum_{m=1}^{N_b} \sum_{n=1}^{N_b} R_{nm} a_n a_m \quad (2.12)$$

$\Delta = \text{minimumdur.}$

Burada, N_b başlangıç tensorlerin sayısı olarak kullanılır, N_s ise istasyonların sayısıdır ve;

$$R_x = \sum_{j=1}^{N_s} \int \left[x_j(t) \right]^2 dt \quad (2.13)$$

$$R_{nm}(p) = \sum_{j=1}^{N_s} \int \left[w_{jn}(t;p) w_{jm}(t;p) \right] dt \quad (2.14)$$

$$G_n(p) = \sum_{j=1}^{N_s} \int \left[w_{jn}(t;p) x_j(t) \right] dt \quad (2.15)$$

Düzenlenerek, $n = 1, \dots, N_b$ normal eşitliği için, $\frac{\partial \Delta}{\partial a_n} = 0$

$$\sum_{m=1}^{N_b} R_{nm} a_m = G_n \quad (2.16)$$

elde edilir.

$[R_{nm}]$ matrisinin tersi, $[R_{nm}^I]$ olur.

$$\sum_l R_{nl} R_{lm}^I = \delta_{nm}, \quad n, m = 1, \dots, N_b \quad (2.17)$$

Burada, δ_{nm} Kroneker deltadır. Daha sonra çözüm,

$$a_n = a_n^0 \equiv \sum_m R_{nm}^I G_m \quad (2.18)$$

dir.

Rezidüel hata miktarı da,

$$\Delta = R_x - \sum_n G_n a_n^0 \quad (2.19)$$

Bu aşamada a_n^0 ve böylece Δ p parametresinin fonksiyonudur. En uygun p, Δ minimumdan elde edilendir, ya da

$$\Psi_M(p) = \frac{\sum_n G_n a_n^0}{R_x} = \frac{\sum_n \sum_m R_{nm}^I G_m G_n}{R_x} = \text{maksimum} \quad (2.20)$$

olmalı.

Ψ_M Sentetik ve gözlemsel dalga şekilleri arasındaki ilişkidir. Gözlemsel ve sentetik dalga şekilleri hemen hemen aynı olduğunda, normalleştirme faktörü R_x de $\Psi_M = 1$ i ortaya çıkarmaktadır.

a_n katsayıları kullanılarak, moment tensorün sonucu aşağı formül ile verilmektedir.

$$[M_{ij}] = \begin{bmatrix} a_2 - a_5 + a_6 & a_1 & a_4 \\ a_1 & -a_2 + a_6 & a_3 \\ a_4 & a_3 & a_5 + a_6 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Başka bir yolla bulunan diğer alt olayın a_n katsayısı, ilk alt olay etkisi çıkarılır, şöyle ki;

$$/x_j(t) = x_j(t) - m_1 w_{jn}(t;p) \quad (2.22)$$

Burada $/x_j(t)$, rezidüel sismogram ve m_1 de ilk alt olayın sismik moment değeridir. Ve $x_j(t)$ ile $/x_j(t)$ yer değiştirdikten sonra yukarıdaki yöntem tekrarlanır. Bu yöntem N_e kere olabilmektedir, burada N_e alt olayların sayısıdır.

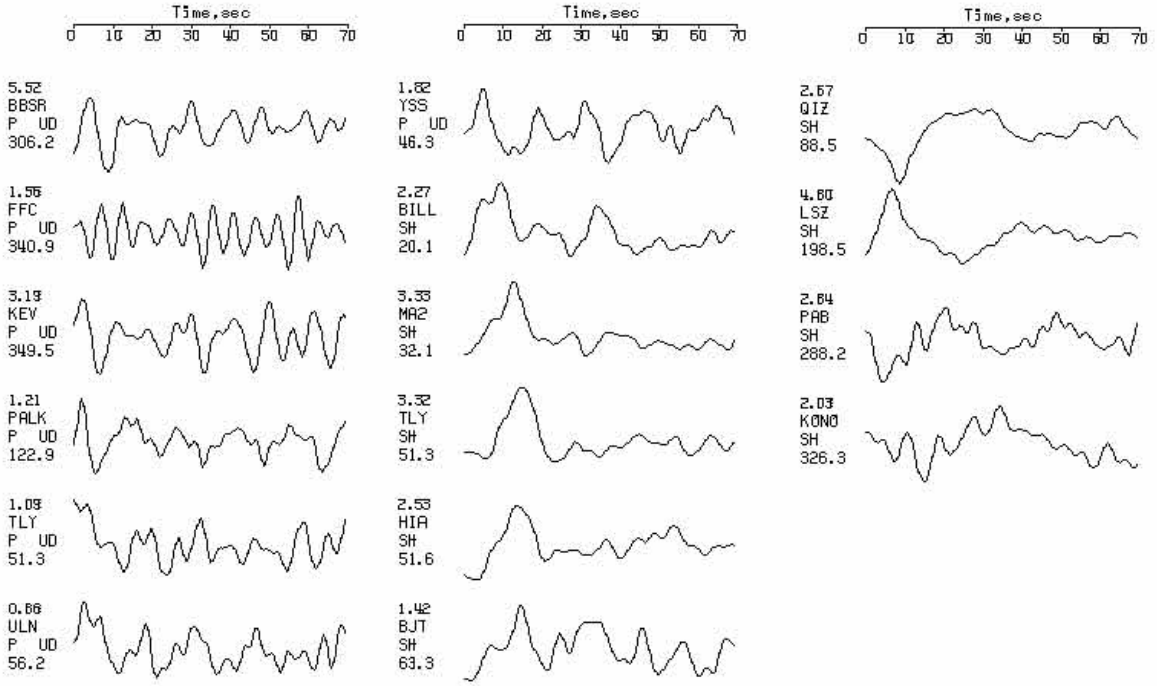
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Veri ve Veriye Uygulanan İşlemler

Çalışmada 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin geniş band (broadband) uzak alan (telesismik) verileri kullanılmıştır. Kullanılan veri 30°-90° dış merkez uzaklıkları arasında seçilmiş olup GDSN (Global Digital Station Network) sismograf ağı tarafından kaydedilmiştir. Veriler internet üzerinden IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) web sayfasındaki (www.iris.washington.edu) veri arşivinden temin edilmiştir. 30°-90° dış merkez uzaklıkları arasındaki istasyonların seçilmesinin nedeni; kaynakla ilişkisi bulunmayan yayılım yolu (propagation path) etkilerinden veriyi olabildiğince arındırmak amaçlıdır. Böylece üst manto ve kabuk yayılımıyla çekirdek difraksiyonuna karşılık gelen etkilerin, dalga şekillerinde içerilmemesine çalışılmıştır.

Verilerden alet tepkileri giderilmiş ve orijinali 0.05 sn olan örnekleme aralığı yeniden örnekleme yapılarak 0.5 sn olarak seçilmiştir. Her istasyon verisi gözle kontrol için veri boyu 70 sn (140 zaman noktası) olarak alınmış ve bir çizim programı yardımıyla P ve SH dalgaları olarak çizdirilmiştir (73 istasyonda P dalgası 63 istasyonda SH dalgası). Gözle kontrol edilen dalga şekillerinde özellikle P dalgalarında gürültü/sinyal oranının büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni depremin büyüklüğünün (magnitüdünün) göreceli olarak küçük olması ($M_w=5.8-6.0$) ve deprem kaynağı civarındaki kabuksal yapının karmaşıklığı olabilir. SH dalgaları genellikle P dalgalarına göre hem daha büyük genlikli hem de daha büyük periyotlu olduğundan daha sade bir şekle sahiptir. Bu gözlemden ters çözüm aşamasında yararlanılacak ve SH dalgalarına P dalgalarına göre daha fazla ağırlık verilecektir. Gözle kontrol edilen dalgardan sorunlu olanlar ayıklanmış ve kalan verilerdeki gürültü seviyesi göz önünde bulundurularak veriye 0.05 ile 0.33 Hz frekansları arasında bant geçişli filtre uygulanmıştır. Sonuç olarak 7 P ve 9 SH dalga şekli kaynak ters çözümlemesinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Seçilen bu dalga şekilleri Şekil 3.1’de çizdirilmiştir.

Verilerin gözle yapılan kontrolünde esas dalga enerjisi varışının ilk 20-25 sn içerisinde olduğundan yola çıkılarak Şekil 3.1’de verilen dalga şekillerinin ilk 25 saniyelik penceresinin ters çözümde kullanılmasına karar verilmiştir. Bu pencere boyu depremin magnitüdü de ($M_w=5.8-6.0$) göz önüne alındığında yeterlidir.



Şekil 3.1. 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin internet ortamından elde edilip ayıklanan ve veri işleme tabii tutulup çizdirilen çeşitli istasyonlardaki 7 P ve 9 SH dalgası yer değiştirme kayıtları.

Çizelge 3.1. Green Fonksiyonu hesaplanması için kullanılan kabuk yapısı (Zor ve ark., 2003).

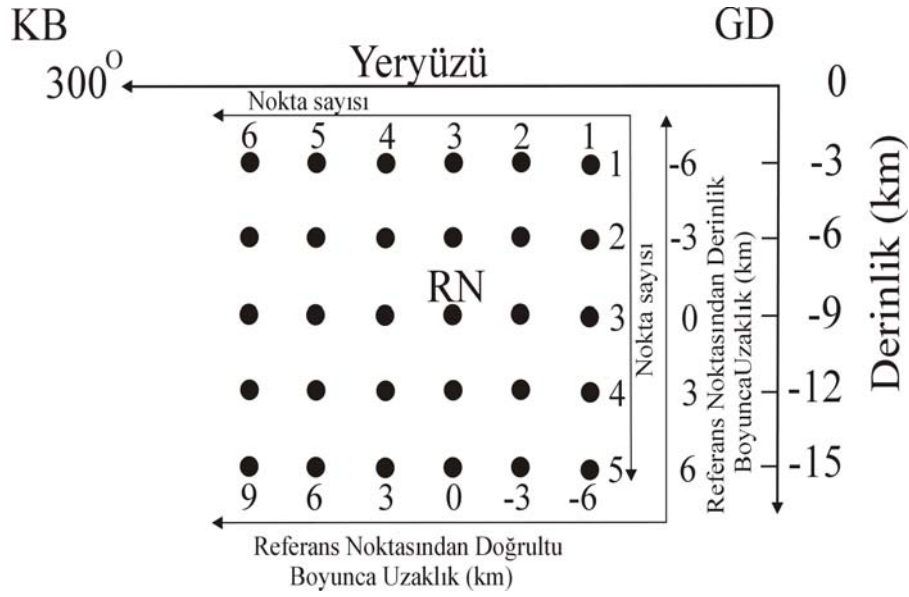
Derinlik (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	Yoğunluk (ρ) $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$
4.0	5.20	3.10	2.60
18.0	6.20	3.60	2.70
28.0	5.20	3.10	3.30
37.0	5.75	3.35	2.60
46.0	6.90	4.00	2.70

3.2. 25 Ocak 2005 Hakkari Depremi Kaynak Ters Çözümü

Green fonksiyonlarının (yapay sismogramların) hesaplanması için Çizelge 3.1'de verilen P dalgası kabuksal hız yapısı kullanılmıştır (Zor ve ark., 2003). S dalgası hız yapısı

$V_s = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} V_p \right)$ genel ifadesinden (Lay ve Wallace, 1995) yararlanılarak hesaplanmıştır.

Modelleme için doğrultu boyunca 6, derinlik boyunca 5 nokta kaynaktan oluşan bir nokta kaynak grid düzlemi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Örnekleme aralığı 1 sn, referans derinliği 9 km, derinlik artım miktarı 3 km ve nokta kaynaklar gridinin doğrultusu 300° (kırılmanın YŞFK doğrultusunda olduğu varsayımı) olarak seçilmiştir. 2 sn yükselim ve düşümlü toplam süresi 5 sn olan yapay (trapezoid) kaynak zaman fonksiyonu ham yapay sismogramların hesaplanmasında kullanılmıştır (Kikuchi ve Kanamori, 1991; Pınar, 1995). Kırılma hızı 2.5 km/sn kabul edilmiştir.



Şekil 3.2. Modellemede kullanılan nokta kaynak grid düzlemi. Doğrultu boyunca 6, derinlik boyunca 5 nokta kaynağın olduğu bir grid düzlemi kullanılmıştır. RN: Referans noktası.

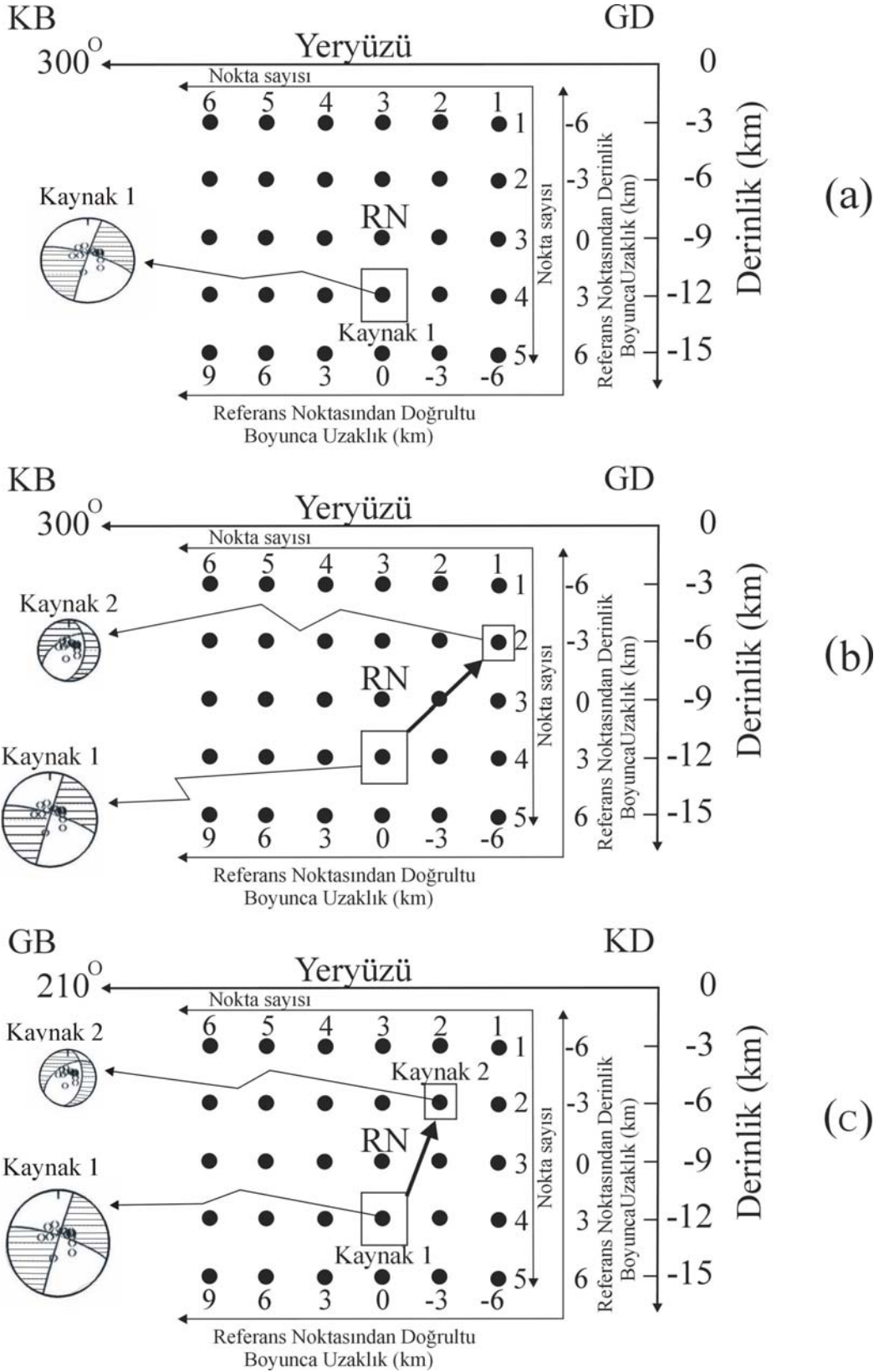
25 Ocak 2005 Hakkari depremi dalga şekli modellemesi hem tek kaynak (alt olay) hem de iki kaynak olarak yapılmıştır. Tek ve iki kaynaklı ters çözümler sonucu elde edilen kaynak parametreleri Çizelge 3.2’de listelenmiştir. Ters çözüm sonuçları nokta kaynaklar gridi üzerinde Şekil 3.3a ve 3.3b’de gösterilmiştir. Tek ve iki kaynaklı modellemeler için sentetik (yapay) ve gözlenmiş sismogramlar arasındaki uyum sırasıyla Şekil 3.4a ve 3.4b’de gösterilmektedir. Her iki ters çözüm için RMS (Root mean squares) hata miktarları (Çizelge 3.2) ve sentetik-gözlenmiş dalga şekillerinin gözle karşılaştırılması iki kaynaklı bir çözümün verileri çok daha iyi modellediğini önermektedir. Ayrıca nokta kaynaklar grid doğrultusu 210° alınarak yani kırılmanın Başkale Fay Kuşağı üzerinde olduğu varsayımı ile de bir ters çözüm yapılmıştır (Şekil 3.3c ve 3.4c) Bu ters çözüm nokta kaynaklar grid doğrultusunun 300° alındığı ters çözüme nazaran çok az farklı bir RMS hatası (0.374’e karşı 0.377) vermiş

(Çizelge 3.2) ve kaynakların mekanizma ve yerleri oldukça benzer çıkmıştır (Şekil 3.3b ile Şekil 3.3c'yi karşılaştırınız). Sadece 2. alt olayın veya kaynağın yeri biraz değişmiştir.

Çizelge 3.2. Modelleme sonucu elde edilen kaynak parametrelerinin ayrıntısı

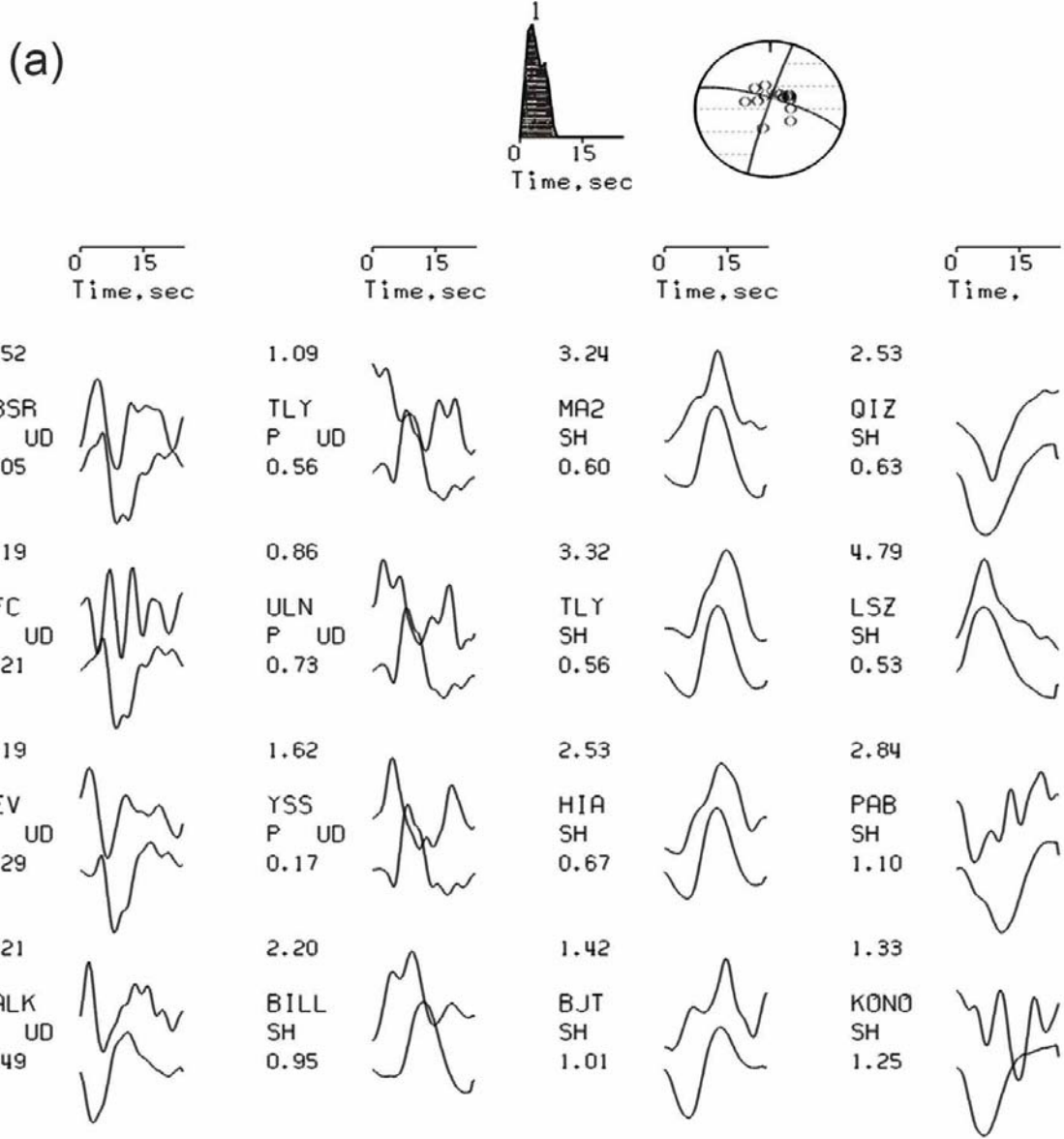
No	Kırılma Zamanı (sn)	Uzaklık (km)	Derinlik (km)	M_0 ($\times 10^{18}$ Nm)	Doğrultu (Strike) ($^{\circ}$)	Eğim (Dip) ($^{\circ}$)	Kayma (Rake) ($^{\circ}$)	RMS Hatası
Tek Kaynak Modellemesi (grid doğrultusu 300$^{\circ}$)								
1	1-9	0.0	3.0	0.35	288.3	76.8	-176.9	0.458
İki Kaynak Modellemesi (grid doğrultusu 300$^{\circ}$)								
1	1-8	0.0	3.0	0.38	287.3	79.3	-178.6	0.377
2	5,5-11	-6.0	-3.0	0.16	240.8	57.4	-52.7	
Toplam				0.36	298.1	70.0	-160.0	
İki Kaynak Modellemesi (grid doğrultusu 210$^{\circ}$)								
1	1-9	0.0	3.0	0.32	287.7	78.4	-178.3	0.374
2	6-13	-3.0	-3.0	0.15	237.5	54.2	-55.1	
Toplam				0.35	300.3	67.7	-157.0	

Bu durum çalışmada kullanılan verinin depremin doğrultu atımlı olduğunu açıkça göstermesine rağmen iki farklı grid doğrultusu yani BFK (sol-yanal faylanma) veya YŞFK (sağa-yanal faylanma) arasında bir ayrım yapacak çözünürlüğe sahip olamadığı şeklinde yorumlanabilir. Bu nedenle bu iki çözüm arasında bir tercih yapmak zordur. Ancak yapılacak tartışmada 2005 Hakkari depreminin sağ-yanal bir faylanma (Şekil 3.3b ve 3.4b) sonucu olduğu tezinden hareket edilerek 2005 Hakkari depremi kaynak özellikleri yapısal jeolojisi açısından yorumlanmaya çalışılacaktır. Sadece bir tartışma için yapılan bu tercihte Doğu Anadolu Bloğu'nun güneyinde uzanan KB-GD uzanımlı sağ yanal fayların varlığı ve bu faylardan biri olan YŞFK'nın deprem kaynak bölgesinin hemen güneydoğusunda uzanmasının payı büyüktür. Yine de 2005 Hakkari depreminin sol-yanal bir faylanma sonucu (BFK'nın devamı üzerinde) olduğu tezi göz ardı edilmemesi de modellemenin bir sonucu olarak gelecekteki çalışmalar için önerilmektedir.

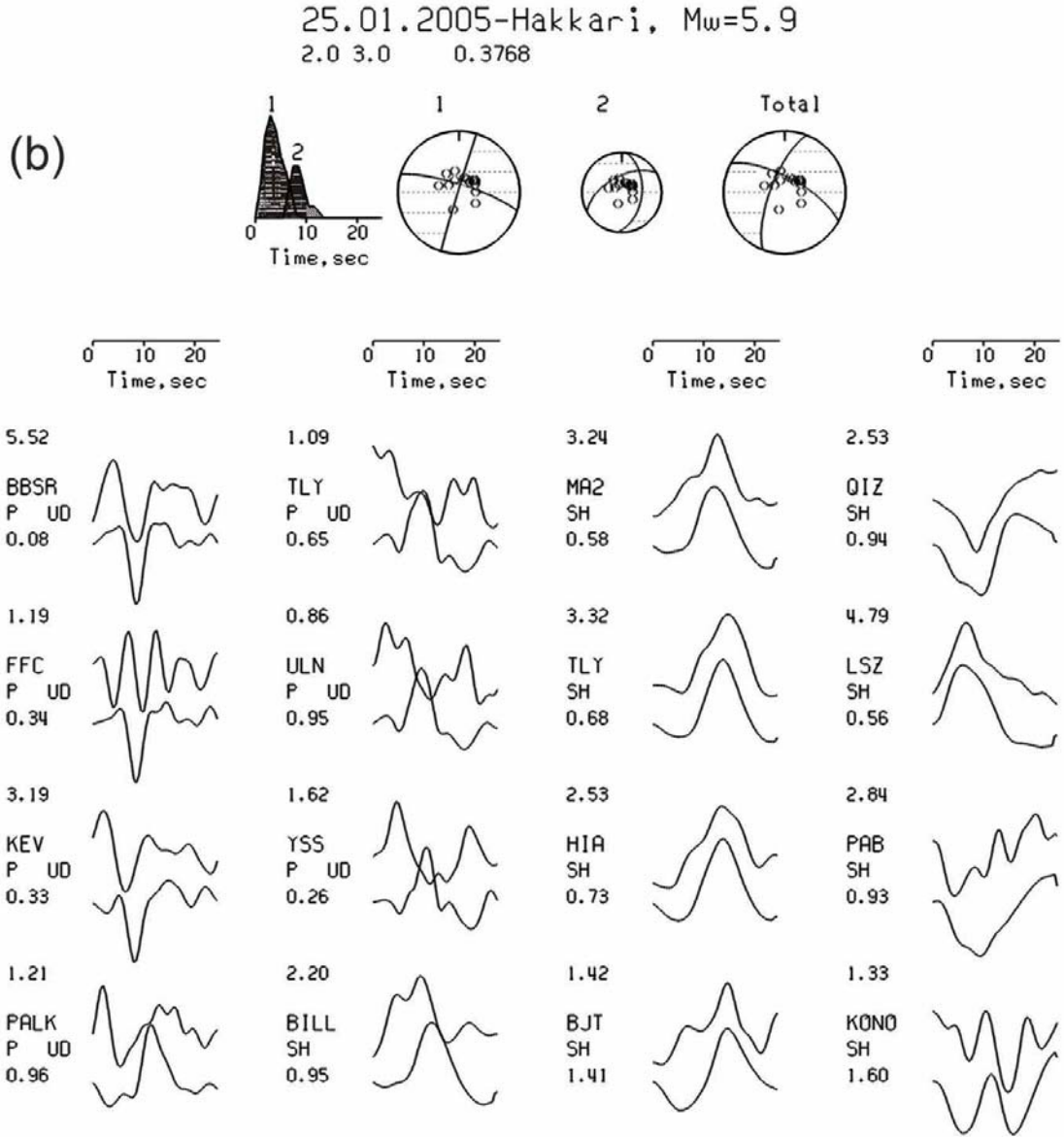


Şekil 3.3. Nokta kaynak grid doğrultusunun 300° olduğu tek ve iki alt olaylı (a ve b) ve nokta kaynak grid doğrultusunun 210° olduğu iki alt olaylı (c) ters çözümler sonucunda elde edilen kaynak modelleri. Kaynak parametreleri için Çizelge 3.2'e bakınız. Grid düzlemleri derinlik boyutunda odak mekanizma çözümleri ise harita görünüşünde gösterilmiştir.

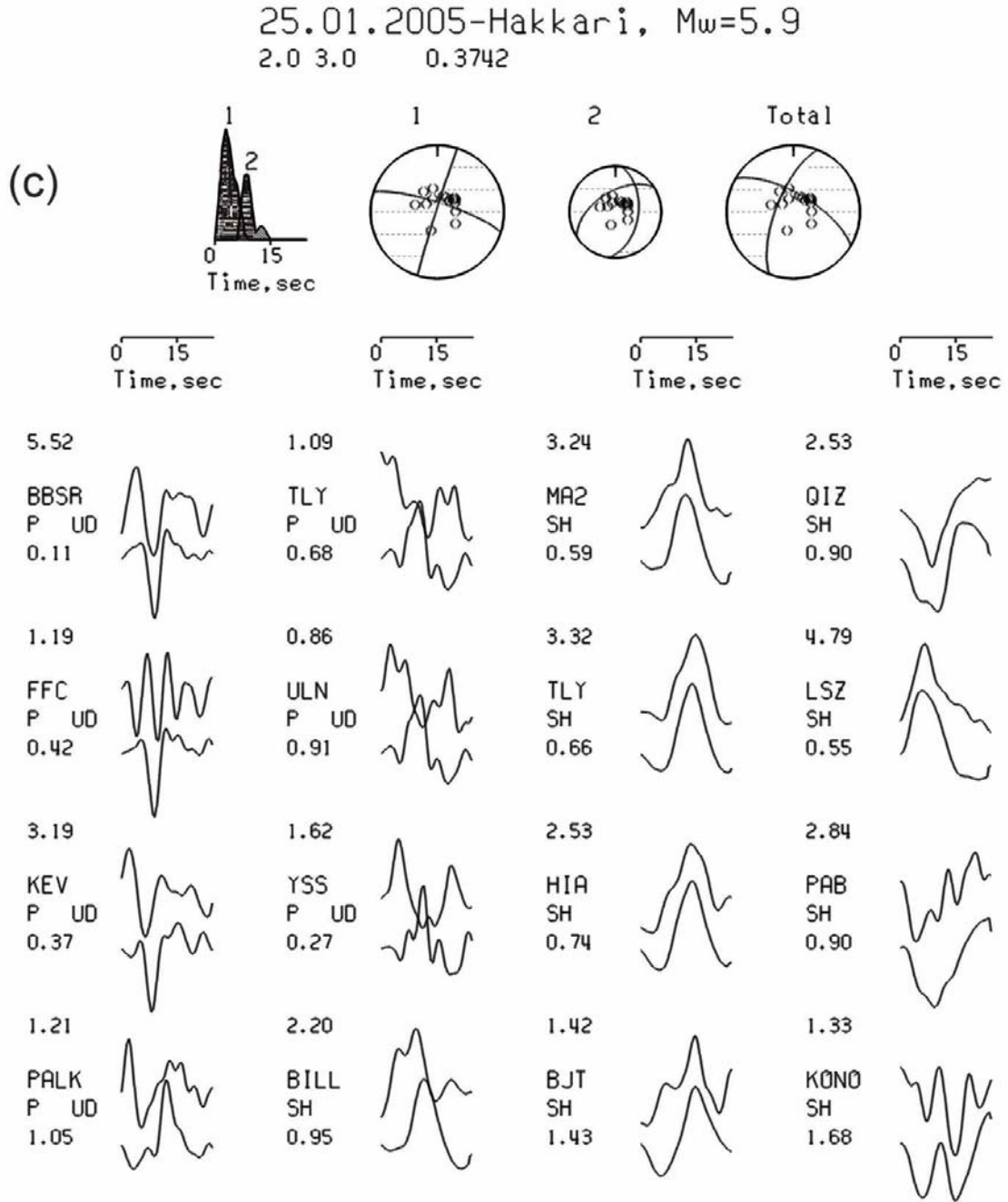
25.01.2005-Hakkari, Mw=5.9
2.0 3.0 0.4584



Şekil 3.4 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin 300° nokta kaynak grid doğrultulu tek (a) ve 2 alt olaylı (b) modellemeleri ve 210° nokta kaynak grid doğrultulu 2 alt olaylı (c) modellemeleri için ters çözümlemede elde edilen kaynak - zaman fonksiyonları, odak mekanizması çözümleri ve gözlemsel-sentetik dalga şekli karşılaştırmaları. Gözlemsel (üsttekiler) ve hesaplanan (alttakiler) dalga şekilleri. Yukarıdaki numaralar, gözlenmiş kayıtların - ve + maksimum değerleri oranının alet büyütmesine bölümünü ifade etmektedir. Altta verilen sismogram genlik oranlarını göstermektedir.



Şekil 3.4 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin 300° nokta kaynak grid doğrultulu tek (a) ve 2 alt olaylı (b) modellemeleri ve 210° nokta kaynak grid doğrultulu 2 alt olaylı (c) modellemeleri için ters çözümlemede elde edilen kaynak - zaman fonksiyonları, odak mekanizması çözümleri ve gözlemsel-sentetik dalga şekli karşılaştırmaları. Gözlemsel (üsttekiler) ve hesaplanan (alttakiler) dalga şekilleri. Yukarıdaki numaralar, gözlenmiş kayıtların - ve + maksimum değerleri oranının alet büyütmesine bölümünü ifade etmektedir. Altta verilen sismogram genlik oranlarını göstermektedir. (devam)



Şekil 3.4 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin 300° nokta kaynak grid doğrultulu tek (a) ve 2 alt olaylı (b) modellemeleri ve 210° nokta kaynak grid doğrultulu 2 alt olaylı (c) modellemeleri için ters çözümlemede elde edilen kaynak – zaman fonksiyonları, odak mekanizması çözümleri ve gözlemlenmiş genlik oranlarının – ve + maksimum değerleri oranının alet büyütmesine bölümünü ifade etmektedir. Alta verilen sismogram genlik oranlarını göstermektedir. (devam)

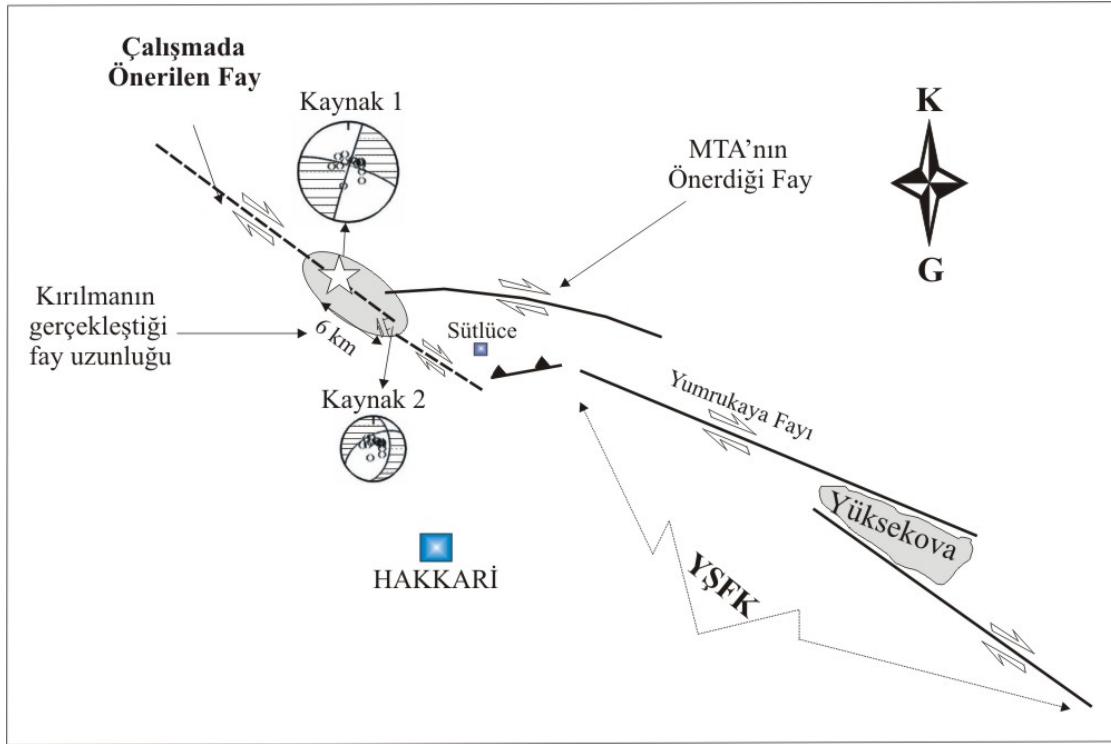
Grid doğrultusunun 300° olduğu iki kaynaklı modelleme sonucunda elde edilen toplam çözüm (doğrultu: 298.1° , eğim: 70.0° , rake= -160.0°) daha önce yapılan (Bkz. Çizelge 1.1) çözümlerle büyük benzerlik göstermekte olup, 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin kaynağındaki faylanmanın sağ yanal doğrultu atımlı olduğunu önermektedir. Doğu Anadolu Bloğu'nun güneyinde uzanan KB-GD uzanımlı sağ yanal fayların varlığı ve bu faylardan biri olan YŞFK'nın deprem kaynak bölgesinin hemen güneydoğusunda uzanması çalışmada elde edilen kaynak çözümünü mantıklı kılmaktadır. Ayrıca 2005 Hakkari depremi odak mekanizması sağ-yanal faylanmaların YŞFK'nın kuzeybatısında Hakkari şehir merkezi kuzeyinde BBK'nı kesen haritalanmamış sağ-yanal faylar olabileceğini düşündürdüğü önemlidir. Nitekim Emre ve ark., (2005) depremin ardından uzay görüntüleri ve hava fotoğraflarından yararlanarak deprem kaynak bölgesi içinde KB-GD uzanımlı, daha önceki fay haritalarında (Şaroğlu ve ark., 1992) yer almayan aktif bir fayı önermişlerdir.

Ters çözüm sonuçları deprem kırılmasının deprem dış merkezi altında 12 km derinlikte büyük olan kaynağın kırılması ile başladığını önermektedir (Bkz. Şekil 3.3b). Bu kaynağın sismik moment serbestlenmesi 7 sn sürmüş olup sismik momenti 0.38×10^{18} Nm'dir. Büyük kaynak sağ yanal bir faylanmaya işaret etmektedir. İkinci ve küçük olan kaynak birinci kaynağın 6 km GD'sunda ve 6 km derinlikte yerleşmiştir. Bu kaynak ağırlığı normal faylanma olan verevine faylanma (rake açısı -53°) odak çözümüne sahiptir. Düşüm düzlemleri yaklaşık KG doğrultuludur. Bu kaynağın kırılması büyük kaynağın kırılmasıyla yaklaşık 2 sn süreyle örtüşmüş ve yaklaşık 5 sn sürmüştür. Bu kaynağa ait kırılmanın açığa çıkardığı sismik moment 0.16×10^{18} Nm'dir. Modelleme sonucu elde edilen kaynak özelliklerinin ayrıntısı Şekil 3.3b ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

KD-GB doğrultulu düzlemin grid düzlemi (grid doğrultusunun 210°) olarak kabul edildiğinde, deprem kırılması esas itibariyle referans noktası olarak seçilen noktanın 3 km altında, 12 km derinlikte gerçekleşmiş (1. alt olay; boşalan sismik moment 0.32×10^{18} Nm) ve KD'ya doğru ilerleyerek 3 km uzaklıkta ve 6 km derinlikte 2. alt olay (boşalan sismik moment 0.15×10^{18} Nm) gerçekleşmiştir (Bkz. Şekil 3.3c). Toplam boşalan sismik moment 0.35×10^{18} Nm ve kaynak parametreleri de doğrultu 300.3° , eğim 67.7° ve rake -157.0° olarak hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 3.2). Buradan depremin moment magnitudünün $M_w=5.7$ olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıda belirttiğimiz gibi telesismik dalgaların ters çözümlemesi ile elde edilen sonuçların yapısal jeoloji açısından yorumu yapılırken depremin KB-GD doğrultusunda bir

sağ-yanal faylanma sonucunda oluştuğu tezinden hareket edilecektir. Bu varsayıma göre deprem kırılmasının Şekil 3.5'deki gibi yapısal yorumu olabilir. Şekil 3.5 yaklaşık bir ölçek gözetilerek çizilmiş olup faylar Hull ve ark., (2002), Koçyiğit (2005) ve Emre ve ark., (2005)'den derlenmiştir. Varsayıldığı gibi deprem sağ yanal faylanma sonucu oluşmuşsa YŞFK KB'ya doğru BBK içinde uzanmalıdır. Büyük kaynağa ait kırılma bu fay üzerinde oluşmuştur. Küçük kaynak normal faylanma mekanizmasına sahip olduğu için YŞFK'nın KB uzantısı olarak önerilen fay üzerinde sağa-aşmalı bir çek-ayır (right-stepped pull-apart) üzerindeki kırılma olarak yorumlanmıştır. Deprem kırılmalarının çek-ayır şeklindeki süreksizliklerde çekirdeklenmesi ve sona ermesinin küresel ölçekte gözlemleri mevcuttur (King, 1986).



Şekil 3.5 2005 Hakkari depreminin çalışmada tercih edilen ters çözümlenmesinin yapısal yorumlanması. Faylar Hull Ve ark., (2002), Koçyiğit (2005) ve Emre vd. (2005)'den derlenmiştir. Ölçek yaklaşıktır.

1646 Van depreminin makrosismik etkileri (Ambraseys ve Finkel, 1995) bu depremin kaynağını oluşturan fayın da 2005 Hakkari depremi kaynağı civarında olabileceğini büyük bir olasılık olarak gündeme getirmektedir (Bkz. Şekil 1.4). Bu bakımdan 2005 Hakkari depremi Van ile Hakkari arasındaki bölgede haritalanmamış fayları gündeme getirmesi bakımından önemlidir. Emre ve ark., (2005)'nin önerdiği fay buna bir örnek oluşturmaktadır. Büyüklüğü 7

civarında olan 1646 Van depreminin kaynağı bu bölgede arazi çalışmaları ile araştırılmalıdır. Çünkü 1646 Van depreminin YŞFK'nın Hakkari il merkezi KB'sındaki kısmını kırması, benzer büyüklükteki 1666 Hakkari depreminin de GD'sundaki kısmını kırması makrosismik gözlemlerle uyumlu bir yaklaşımdır.

En son bir GPS çalışması (Reilinger ve ark., 2006) BBK güneyinde Şırnak'ta 17 mm/yıl'lık ve BBK kuzeyinde Van'da ise 15 mm/yıl'lık yaklaşık aynı yönde (KD) bir kabuk hızı önermektedir. Arap levhasının hareketinin temsil eden Şırnak'taki ölçüm ile Doğu Anadolu Bloğu'nun hareketini temsil eden Van'daki ölçümlerin pek farklı olmaması Arap levhasının KD yönlü hareketinin neden olduğu deformasyonun büyük bir kısmının Doğu Anadolu Bloğu'na iletildiğini önermektedir. Yani BBK bu deformasyonun çok küçük bir kısmını karşılamaktadır. Bu durum McClusky ve ark., (2000) tarafından da gündeme getirilmiştir. Nitekim GPS ölçümlerinin gösterdiği kabuksal hız alanını kabuksal blokların hareketi ile modelleyen Vernant ve ark., (2004) Doğu Anadolu Bloğu güneyinde, BBK kuzeyinde Hakkari-Van yöresini de kapsayan bir bölgede KB-GD doğrultulu ve 5-8 mm/yıl hızlı bir sağ yanal makaslama zonu önermektedir ki bu sonuç YŞFK'nun uzanım ve faylanma tipi ile uyumludur. 1646 ve 1666 depremlerinden bu yana yaklaşık 350 yıl geçtiği ve GPS kabuksal hız alanının modellemeleri dikkate alınarak 2.8 m'lik bir deformasyon 2005 Hakkari depremi kaynak alanı için hesaplanabilir. Bu deformasyon birikimi 7 büyüklüğünde bir depremi üretebilecek bir birikimdir. Dolayısıyla bölge için önemli bir deprem tehlikesi mevcuttur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 25 Ocak 2005 Hakkari depreminin telseismik uzaklıklarda kayıt edilen P ve SH dalga şekilleri bir nokta-kaynak ters çözüm yöntemi (Kikuchi ve Kanamori, 1991) kullanılarak incelenerek deprem kaynak özellikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Yapılan ters çözüm modellemeleri sonucunda aşağıda sıralanan sonuçlara varılmıştır.

2005 Hakkari depreminin telesismik cisim dalgalarının tek alt olaylı bir kaynak süreci ile modellenmesinde dalga şekillerine uyum açısından bir yetersizlik görülmüştür. İki alt olaylı bir kaynak süreci ile modellemede dalga şekillerine tatmin edici bir uyuma ulaşılmıştır. Bu durum kırılmanın karmaşıklığı olarak yorumlanabilir.

İki farklı nokta-kaynak grid doğrultusu (300° ve 210°) kullanılarak iki alt olaylı kaynak süreci ile modelleme yapılarak kırılma doğrultusunun çalışmada kullanılan veriden yorumlanıp yorumlanamayacağı araştırılmış ve verinin bu ayrımı yapacak çözünürlükte olmadığı kanaatine varılmıştır. Her iki doğrultu sonucu elde edilen kaynak parametreleri hemen hemen aynıdır. Düğüm düzlemlerinden hangisinin fay düzlemi olduğu kesin olarak belirlenememiştir.

Doğu Anadolu'nun 2005 Hakkari depreminin meydana geldiği kesiminde KB-GD uzanımlı sağ yanal fayların uzanması ve bu faylardan birinin hemen deprem kaynak bölgesi civarında uzanması KB-GD uzanımlı düzlemin büyük olasılıkla fay düzlemi olabileceğini düşündürmektedir.

Faylanmanın sağ-yanal olduğu kabul edildiğinde, ters çözümleme sonuçları deprem kırılmasının deprem dış merkezi altında 12 km derinlikte büyük olan kaynağın sağ-yanal kırılması ile başladığını önermektedir. Bu kaynağın sismik moment serbestlenmesi 7 sn sürmüş olup sismik momenti 0.38×10^{18} Nm'dir. İkinci ve küçük olan kaynak birinci kaynağın 6 km GD'sunda ve 6 km derinlikte yerleşmiştir. Bu kaynak ağırlığı normal faylanma olan verevine faylanma (rake açısı= -53°) odak çözümüne sahiptir. Bu kaynağın kırılması büyük kaynağın kırılmasıyla yaklaşık 2 sn süreyle örtüşmüş ve yaklaşık 5 sn sürmüştür. Bu kaynağa ait kırılmanın açığa çıkardığı sismik moment 0.16×10^{18} Nm'dir. Toplam boşalan sismik moment 0.36×10^{18} Nm ve kaynak parametreleri de doğrultu 298.1° , eğim 70.0° ve rake -160.0° olarak hesaplanmıştır.

Faylanmanın sol-yanal olduğu kabul edildiğinde, deprem kırılması esas itibariyle referans noktası olarak seçilen noktanın 3 km altında, 12 km derinlikte gerçekleşmiş (1. alt olay; boşalan sismik moment 0.32×10^{18} Nm) ve KD'ya doğru ilerleyerek 3 km uzaklıkta ve 6 km derinlikte 2. alt olay (boşalan sismik moment 0.15×10^{18} Nm) gerçekleşmiştir. Toplam boşalan sismik moment 0.35×10^{18} Nm ve kaynak parametreleri de doğrultu 300.3° , eğim 67.7° ve rake -157.0° olarak hesaplanmıştır.

2005 Hakkari deprem kırılmasının sağ-yanal olduğu varsayımından hareketle ters çözümleme ile elde edilen sonuçların olası yapısal ilişkileri yorumlanmıştır. Varsayıldığı gibi deprem sağ yanal faylanma sonucu oluşmuşsa YŞFK KB'ya doğru BBK içinde uzanmalıdır. Kaynak sürecindeki büyük alt olay bu fay üzerindeki kırılma ile oluşmuştur. Küçük alt olayın YŞFK'nın KB devamı olarak önerilen fay üzerinde küçük ölçekli sağa-aşmalı bir çek-ayır üzerinde kırılma sonucu olduğu önerilmiştir.

Ters çözümleme sonuçları depremin moment magnitudünün $M_w=5.7$ olduğunu önermektedir. Çalışma sonucunda elde edilen kaynak parametreleri HRV, USGS ve ETHZ gibi uluslar arası deprem araştırma merkezlerinin önerdikleri ile uyum içindedir.

KAYNAKLAR

- Aki, K., Richards, P.G., 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W.H. Freeman and Co., New York, San Francisco, 932 pp.
- Alsan, E., Tezuçan, L., Bath, M., 1975. *An earthquake catalogue for Turkey for the interval 1913-1970*, Kandilli Obs. İstanbul, Turkey, and Seism. Inst. Upsala, Sweden, Report No. 7-75, 166 pp.
- Ambraseys, N. N., Finkel, C. F., 1995. *The seismicity of Turkey and adjacent areas: a historical review 1500-1800*, Eren Publication, İstanbul, ISBN 975-7622-38-9, 240 pp.
- Ayhan, E., Alsan, E., Sancaklı, N., Üçer, S.B., 1984. *Türkiye dolayları deprem kataloğu 1881-1981*, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, İstanbul, Turkey, 126 pp.
- Barka, A., Kadinsky-Cade, K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*. (7): 663-684.
- Barka, A., Reilinger, R., 1997. Active tectonics of the eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, XL(3): 587-610.
- Degens, E.T., Wong, H.K, Kurtman, F., Finckh, P., 1978. Geological development of Lake Van, *The Geology of Lake Van*, M.T.A. Ankara, Turkey, (169): 134-146.
- Emre,Ö., Doğan,A., Özalp, S., Yıldırım, C., 2005. *25 Ocak 2005 Hakkari Depremi Hakkında Ön Değerlendirme Raporu*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
- Eyidoğan, H., 1983. *Bitlis-Zağros bindirme ve kıvrımlı kuşağının sismotektonik özellikleri*, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, Doktora tezi, 112 sayfa.
- Hull, A., Erdik, M., Turfan, M., Pavone, M., Atay, E., 2002. Seismic hazard assessment for the Hakkari Project. *Hydropower & Dams*, (5):66-70
- Incorporated Research Institutions for Seismology web sayfası (www.iris.washington.edu)
- Jackson, J., McKenzie, D. P., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J.R. Astr. Soc.* (77): 185-264.
- Jackson, J., (1992). Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in Eastern Turkey and the Caucasus, *J. Geophys. Res.* (97):12471-12479.
- Kalafat, D., 1995. 1964-1994 yılları arasında Türkiye ve yakın çevresinde etkili olmuş depremlerin makrosismik gözlemleri. *Deprem Araştırma Bülteni*. (73): 60-97
- Kanamori, H., Hauksson, E. Heaton, T., 1997. Real-time seismology and earthquake hazard mitigation. *Nature*. (390): 461-464.

- Kikuchi, M., Fukao, Y., 1985. Iterative deconvolution of complex body waves from great earthquakes-the Tokachi-Oki earthquake of 1968. *Physc. Earth Planetary Interiors*. (37): 235-248
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 1982. Inversion of complex body waves. *Bull. Seis. Soc. Am.* (72): 491-506.
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 1991. Inversion of complex body waves-III. *Bull. Seism. Soc. Am.* (81): 2335-2350.
- King, G.C.P., (1986). Speculations on the geometry of the initiation and termination processes of earthquake rapture and its relation to morphology and geological structure. *Pure appl. Geophys.* (124): 567-585.
- Koçyiğit, A., Yılmaz, A., Adamia, S., Kuloshvili, 2001. Neotectonics of East Anatolia plateau (Turkey) and lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. *Geodinamica Acta.* (14): 177-195.
- Koçyiğit, A., 2005. **2005.01.25, Mw=5.9 Sütluce (Hakkari) Depreminin Kaynağı: Başkale Fay Kuşağı, GD Türkiye.** Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart 2005, Kocaeli
- Lay, T., Wallace, T.C., 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press, San Diego, ISBN 0-12-732870-X.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N., Veis, G., 2000. GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *J. geophys. Res.*(105): 5695-5719.
- Özçelik, S., 2004. **Derin Depremlerin (400-670 km) Oluşum Mekanizmalarının Dalga Şekli Ters Çözüm Yöntemiyle Araştırılması** (yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pınar, A., 1995. **Rupture process and spectra of some major Turkish earthquakes and their seismotectonic implications** (PhD Thesis). Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Pınar, A., 1998. Source inversion of the October 1, 1995 Dinar, earthquake ($M_s=6.1$): A rupture model with implications for seismotectonics in SW Turkey. *Tectonophysics*. (292): 255-266.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G., GPS Constraints on

- Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*. **111** (B5): Art. No. B05411 May 31, 2006.
- Sandvol, E., Türkelli, N., Barazangi, M., 2003. The Eastern Turkey Seismic Experiment: The study of a young continent-continent collision: An example from eastern Turkey, *Geophys. Res. Lett.* **30** (24): 8038.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. *Active fault map of Turkey*, Publ. Miner. Res. Explor. Ins. Turk., Ankara, Turkey.
- Şengör, A. M. C., Görür, N., Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, *Strike-slip faulting and basin formation*, (Editors: Biddle, K. T., Christie-Blick, N.) Special Publication, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, **37**, 227-264.
- Shearer, P.M., 1999. *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press, San Diego, ISBN 0-521-62478-9.
- Stein, S., Wysession, M., 2003. *An Introduction To Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell publishing, ISBN 0-86542-078-5.
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., 1981. *Historical earthquake catalogue of Turkey and its vicinity*. Turk. Sci. Res. Found. TBAG, **341**, 122 pp.
- Taymaz, T., Eyidoğan, H., Jackson, J., 1991. Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian fault zone (Turkey). *Geophys. J. Int.* (106): 537-550.
- Toksöz, M.N., Nabelek, J., Arpat, E., 1978. Source properties of the 1976 earthquake in eastern Turkey: a comparison of field data and teleseismic results. *Tectonophysics*. (49): 199-205.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J.Int.* (157): 381-398.
- Zor, E., Sandvol, E., Gürbüz, C., Türkelli, N., Seber, D., Barazangi, M., 2003. The crustal structure of the East Anatolian plateau (Turkey) from receiver function. *Geophys. Res. Lett.* **30** (24): 8044, doi:10.1029/2003GL018192.

ÖZ GEÇMİŞ

Kubilay ATALAY, 1974 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1991 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenimine başladı ve 1995 yılında mezun oldu. 2005 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı.

2002 yılında girmiş olduğu Kamu Personeli Seçme Sınavı sonucunda Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde Programcı olarak çalışmaya başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.