

# Hestonov model stohastičke volatilnosti

---

**Begić, Marija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:183182>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2021-11-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Marija Begić

**HESTONOV MODEL STOHAŠTIČKE**  
**VOLATILNOSTI**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
doc. dr. sc. Vanja Wagner

Zagreb, studeni, 2020.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

*Mojim roditeljima*

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iv</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Osnovni razvoj cijena</b>	<b>3</b>
2.1 Brownovo gibanje i Itôv integral . . . . .	3
2.2 Modeliranje na tržištu . . . . .	8
<b>3 Hestonov model za europske opcije</b>	<b>9</b>
3.1 Dinamika modela . . . . .	9
3.2 Svojstva procesa varijance . . . . .	12
3.3 Cijena europske call opcije . . . . .	13
3.4 Hestonova parcijalna diferencijalna jednađba . . . . .	14
3.5 Parcijalne diferencijalne jednađbe za $P_1$ i $P_2$ . . . . .	19
3.6 Hestonova funkcija . . . . .	21
3.7 Svojstva Hestonovog modela . . . . .	23
<b>4 Rješavanje Heston-Riccatijeve jednađbe</b>	<b>25</b>
4.1 Riccatijeva jednađba u općenitoj formi . . . . .	25
4.2 Prinos od dividende i cijena put opcije . . . . .	27
4.3 Black-Scholesov model kao poseban slučaj Hestonovog modela . . . . .	28
<b>5 Diskretizacija</b>	<b>31</b>
5.1 Diskretizacija drugog reda za Cox-Ingersoll-Ross-ov model . . . . .	31
5.2 Ninomiya-Victoir shema . . . . .	32
5.3 Prilagodba diskretizacije kada je $\sigma^2 > 4a$ . . . . .	32
5.4 Diskretizacija Hestonovog modela . . . . .	34
<b>6 Prilagodba modela i simulacija u R-u</b>	<b>35</b>
6.1 Inverzni pristup . . . . .	35

6.2	nlm i nlminb funkcije u R-u . . . . .	36
6.3	quantmod paket u R-u . . . . .	37
	<b>Bibliografija</b>	<b>41</b>

# Poglavlje 1

## Uvod

Black-Scholes-Mertonov model najpoznatiji je matematički model na financijskim tržištima, u kojem se cijena dionica modelira pomoću geometrijskog Brownovog gibanja. U radu iz 1993. godine, matematičar i ekonomist Steven Heston predlaže generalizaciju Black-Scholes-Mertonovog modela u kojem se volatilitet rizične imovine modelira kao slučajni proces. Ta kombinacija Black-Scholes-Mertonovog i Cox-Ingersoll-Ross modela poznata je pod nazivom Hestonov model stohastičke volatiliteta i danas je jedan od najčešće korištenih modela na financijskim tržištima. Cilj diplomskog rada je uvesti Hestonov model preko pripadnog sustava stohastičkih diferencijalnih jednačini, analizirati njegovu dinamiku te odrediti cijenu call opcije na dionicu u polu-zatvorenoj formi. U Hestonovom modelu pojam diskretne sheme koristimo za aproksimaciju neprekidnih diferencijalnih jednačini pomoću diskretnih diferencijalnih jednačini. Kao temelj diskretne sheme za Hestonov model promatramo Ninomiya-Victoir shemu. Radi boljeg razumijevanja samog modela i njegove pozadine zadnji dio rada obrađuje prilagodbu modela i njegovu simulaciju u programu R. Najčešća metoda za prilagodbu je tržišno implicirani ili inverzni pristup koji pretpostavlja da su postojeće cijene na tržištu približno jednake stvarnim cijenama financijskih instrumenata.





# Poglavlje 2

## Osnovni razvoj cijena

### 2.1 Brownovo gibanje i Itôv integral

Prikaz Hestonovog modela započinjemo uvodom u osnovne pojmove koji se koriste kroz sve vremenski neprekidne modele financijskih tržišta. Neka je  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  vjerojatnosni prostor i  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t; t \geq 0)$  filtracija.

**Definicija 2.1.1.** *Brownovo gibanje  $W = (W_t; t \geq 0)$  je slučajni proces za koji vrijedi:*

- $W_0 = 0$ ,
- *neprekidnost trajektorija;  $t \rightarrow W_t$  je gotovo sigurno neprekidno preslikavanje,*
- *$W_t$  ima nezavisne priraste, tj. za svaki  $0 < t_1 < \dots < t_n$  varijable  $W_{t_1}, W_{t_2} - W_{t_1}, \dots, W_{t_n} - W_{t_{n-1}}$  su nezavisne,*
- *za svaki  $0 \leq s < t$  vrijedi  $W_t - W_s \sim N(0, t - s)$ .*

Prije definicije Itôvog integrala potrebno je prisjetiti se jednostavnih procesa. Adaptiran slučajni proces  $H = (H_t; t \in [0, T])$  zove se jednostavan proces ako je jednak  $\sum_{j=0}^{n-1} \phi_j 1_{[t_j, t_{j+1})}$  za neku particiju  $\Pi = \{0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n < T\}$  intervala  $[0, T]$  i omeđene slučajne varijable  $\phi_j; j = 0, 1, \dots, n-1$  takve da je svaka  $\phi_j$   $\mathcal{F}_{t_j}$ -izmjeriva. S  $\epsilon_T$  označavamo familiju svih adaptiranih jednostavnih slučajnih procesa na  $[0, T]$ .

Za slučajni proces  $H \in \epsilon_T$  definiramo slučajni proces  $I = (I_t; t \in [0, T])$  sa

$$I_t = \sum_{j=0}^{n-1} \phi_j (W_{t_{j+1} \wedge t} - W_{t_j \wedge t}).$$

Proces  $I$  zovemo Itôv integral jednostavnog procesa  $H$  u odnosu na Brownovo gibanje  $W$  i označavamo ga sa  $I_t = \int_0^t H_s dW_s = (HW)_t$ .

Za prostor općih integranada uzimamo familiju  $\mathbb{F}$ -adaptiranih slučajnih procesa  $H = (H_t; t \in [0, T])$  za koje vrijedi  $\mathbb{E}[\int_0^T H_t^2 dt] < \infty$ . Tu familiju označavamo sa  $L_{ad}^2([0, T] \times \Omega)$ . Prostor  $L_{ad}^2([0, T] \times \Omega)$  je vektorski prostor sa skalarnim produktom definiranim sa:

$$\langle H, K \rangle_{L_{ad}^2} = \mathbb{E} \left[ \int_0^T H_t K_t dt \right]$$

za sve  $H, K \in L_{ad}^2([0, T] \times \Omega)$  i pripadnom normom

$$\| H \|_{L_{ad}^2}^2 = \langle H, H \rangle_{L_{ad}^2}.$$

Kako bismo izrazili Itôv integral koristimo aproksimaciju procesa  $H \in L_{ad}^2([0, T] \times \Omega)$  nizom jednostavnih procesa  $H^{(n)} \in \epsilon_T$ . Tada Itôv integral procesa  $H$  obzirom na Brownovo gibanje  $W = (W_t; t \in [0, T])$  možemo definirati kao limes integrala jednostavnih integranada:

$$(HW)_t = I_t = \int_0^t H_u dW_u.$$

Dakle, vrijedi:

$$\int_0^t H_u dW_u = (L^2) \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^t H_u^{(n)} dW_u.$$

**Definicija 2.1.2.** *Neka je  $W = (W_t; t \geq 0)$  Brownovo gibanje. Itôv proces je slučajni proces  $X = (X_t; t \geq 0)$  oblika:*

$$X_t = X_0 + \int_0^t H_s dW_s + \int_0^t V_s ds$$

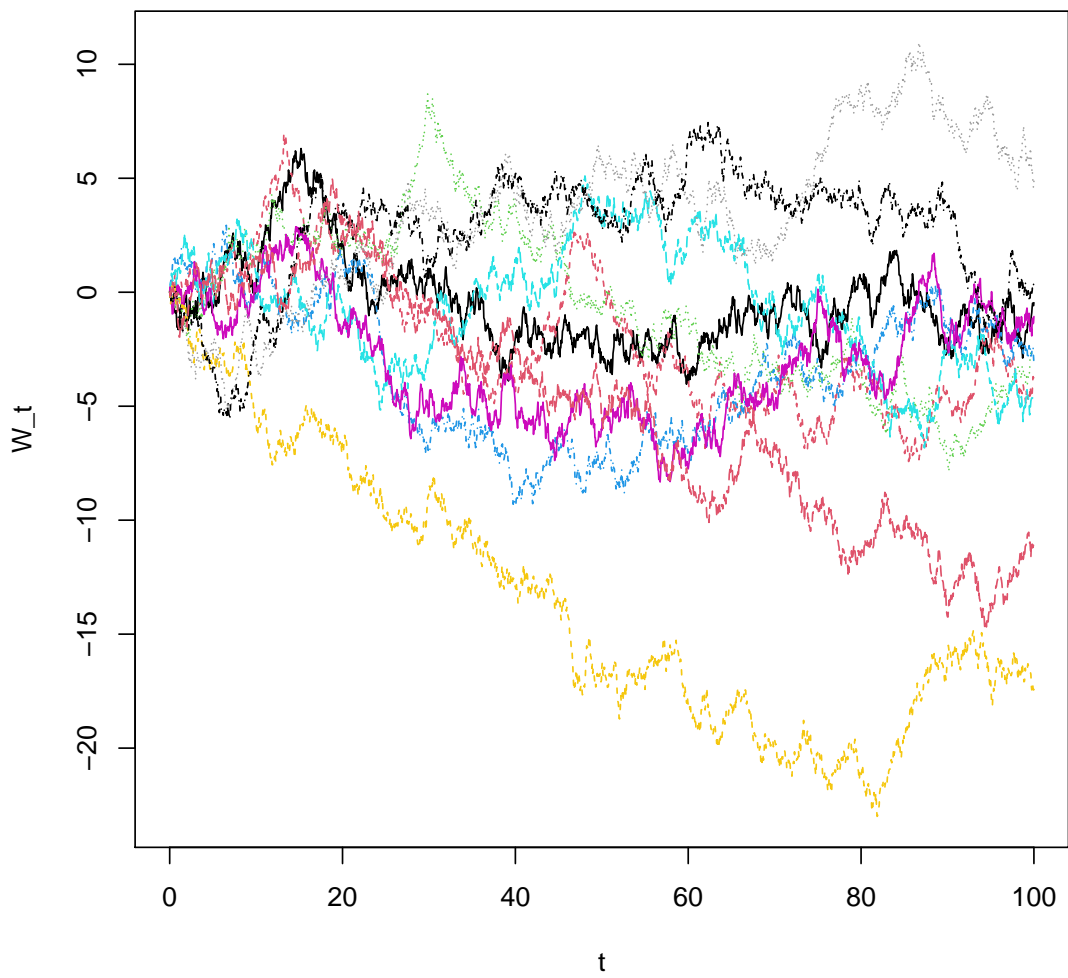
gdje je  $X_0 \in \mathbb{R}$ , a  $H = (H_t; t \geq 0)$  i  $V = (V_t; t \geq 0)$   $\mathbb{F}$ -adaptirani procesi takvi da je  $H \in L_{ad}^2([0, T] \times \Omega)$  i  $\int_0^t |V_s| ds < \infty$  g.s. za svaki  $t \geq 0$ .

**Definicija 2.1.3.** *Neka je  $X = (X_t; t \geq 0)$  Itôv proces te  $K = (K_t; t \geq 0)$  adaptiran proces za koji vrijedi  $\mathbb{E}[\int_0^t K_s^2 H_s^2 ds] < \infty$  te  $\int_0^t |K_s V_s| ds < \infty$  za svaki  $t \geq 0$ . Itôv integral od  $K$  obzirom na Itôv proces  $X$  definiran je formulom:*

$$\int_0^t K_s dX_s = \int_0^t K_s H_s dW_s + \int_0^t K_s V_s ds.$$

**Definicija 2.1.4.** *Neka je  $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  i  $\Pi = \{0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = T\}$  particija intervala  $[0, T]$ . Definiramo  $p$ -varijaciju od  $f$  na  $\Pi$ :*

$$V^{(p)}(f, \Pi) = \sum_{j=1}^n |f(t_j) - f(t_{j-1})|^p.$$



Slika 2.1: Simulacija trajektorija 10 Brownovih gibanja

**Definicija 2.1.5.** Kažemo da je slučajni proces  $X = (X_t; t \geq 0)$  konačne kvadratne varijacije ako postoji slučajni proces  $\langle X \rangle = (\langle X \rangle_t; t \geq 0)$  takav da:

$$\langle X \rangle_t = (\mathbb{P}) \lim_{\|\Pi\| \rightarrow 0} V^{(2)}(X, \Pi) = (\mathbb{P}) \lim_{\|\Pi\| \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n |X_{t_j} - X_{t_{j-1}}|^2.$$

Sljedeću tvrdnju navodimo bez dokaza, koji se može pronaći u [6].

**Teorem 2.1.6.** *Itôva formula za Itôv proces*

Neka je  $X = (X_t; t \geq 0)$  Itôv proces i  $f$  funkcija s neprekidnim parcijalnim derivacijama  $f_t(t, x)$ ,  $f_x(t, x)$  i  $f_{xx}(t, x)$ . Tada za svaki  $T \geq 0$  vrijedi:

$$f(T, X_T) = f(0, X_0) + \int_0^T f_t(t, X_t)dt + \int_0^T f_x(t, X_t)dX_t + \frac{1}{2} \int_0^T f_{xx}(t, X_t)d\langle X \rangle_t.$$

Itôva formula se jednostavnije pamti u diferencijalnom obliku:

$$df(t, X_t) = f_t(t, X_t)dt + f_x(t, X_t)dX_t + \frac{1}{2}f_{xx}(t, X_t)dX_t dX_t.$$

U slučaju Brownovog gibanja dobivamo formulu:

$$df(t, W_t) = f_t(t, W_t)dt + f_x(t, W_t)dW_t + \frac{1}{2}f_{xx}(t, W_t)dt.$$

Neka je  $Z$  nenegativna slučajna varijabla na promatranom vjerojatnosnom prostoru  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  s filtracijom  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t; 0 \leq t \leq T)$  pri čemu je  $T > 0$  fiksno vrijeme te neka za nju vrijedi:  $\mathbb{P}(Z > 0) = 1$  i  $\mathbb{E}Z = 1$ . Definiramo vjerojatnost  $\mathbb{P}^*$  na  $(\Omega, \mathcal{F})$  sa:

$$\mathbb{P}^*(A) = \int_A Z(\omega)d\mathbb{P}(\omega) = \mathbb{E}[1_A Z]. \quad (2.1)$$

Proces Radon-Nikodymove derivacije  $(Z_t; 0 \leq t \leq T)$  definira se kao:

$$Z_t = \mathbb{E}[Z | \mathcal{F}_t]$$

za sve  $0 \leq t \leq T$ .

Elementarni teorem za promjenu mjere na vjerojatnosnom prostoru poznat je pod nazivom Girsanovljevi teorem. Za dokaz pogledati [6, Teorem 6.4].

**Teorem 2.1.7. Girsanovljev teorem**

Neka je  $W = (W_t; 0 \leq t \leq T)$  Brownovo gibanje na vjerojatnosnom prostoru  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  te neka je  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t; 0 \leq t \leq T)$  filtracija za to Brownovo gibanje. Neka je  $\Theta = (\theta_t; 0 \leq t \leq T)$  adaptirani slučajni proces. Definiramo:

$$Z_t = \exp\left(-\int_0^t \theta_u dW_u - \frac{1}{2} \int_0^t \theta_u^2 du\right)$$

$$W_t^* = W_t + \int_0^t \theta_u du$$

te pretpostavimo da je  $\mathbb{E} \int_0^T \theta_u^2 Z_u^2 du < \infty$ . Stavimo  $Z = Z_T$ . Tada je  $\mathbb{E}Z = 1$ , te je uz vjerojatnost  $\mathbb{P}^*$  definiranu u (2.1) slučajni proces  $W^* = (W_t^*; 0 \leq t \leq T)$  Brownovo gibanje.

Nadalje navodimo Girsanovljev dvodimenzionalni teorem koji nam je potreban kroz daljnji rad.

**Teorem 2.1.8. Girsanovljev dvodimenzionalni teorem[3]**

Neka je  $B = (B^{(1)}, B^{(2)}) = ((B_t^{(1)}, B_t^{(2)}); t \geq 0)$  dvodimenzionalno Brownovo gibanje, odnosno neka su  $B^{(1)} = (B_t^{(1)}; t \geq 0)$  i  $B^{(2)} = (B_t^{(2)}; t \geq 0)$  dva nezavisna Brownova gibanja na vjerojatnosnom prostoru  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  obzirom na filtraciju  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t; t \geq 0)$ ,  $T > 0$  i  $\Theta = (\theta_t; t \geq 0) = ((\theta_t^{(1)}, \theta_t^{(2)}); t \geq 0)$  2-dimenzionalan adaptiran slučajni proces. Definiramo:

$$Z_t = \exp\left(-\int_0^t \theta_u dB_u - \frac{1}{2} \int_0^t \|\theta_u\|^2 du\right)$$

$$\widetilde{B}_t^{(i)} = B_t^{(i)} + \int_0^t \theta_u^{(i)} du \quad i = 1, 2$$

pri čemu je:

$$\|\theta_u\|^2 = \int_0^t (\theta_u^{(1)})^2 du + \int_0^t (\theta_u^{(2)})^2 du$$

$$\int_0^t \theta_u dB_u = \int_0^t \theta_u^{(1)} dB_u^{(1)} + \int_0^t \theta_u^{(2)} dB_u^{(2)}$$

te pretpostavimo da vrijedi:  $\mathbb{E} \int_0^T \|\theta_u\|^2 Z_u^2 du < \infty$ . Stavimo  $Z = Z_T$ . Tada je  $\mathbb{E}Z = 1$  te je uz vjerojatnosnu mjeru  $\mathbb{P}^*$  definiranu sa:

$$\mathbb{P}^*(A) = \int_A Z(\omega) d\mathbb{P}(\omega)$$

proces  $\widetilde{B} = (\widetilde{B}^{(1)}, \widetilde{B}^{(2)})$  2-dimenzionalno Brownovo gibanje.

## 2.2 Modeliranje na tržištu

Model počinjemo konstruirati pod pretpostavkom da se financijsko tržište koje promatramo sastoji od dvije vrste imovina. Prva imovina na našem tržištu je nerizična imovina cijene  $R_t$  u trenutku  $t$ . Ova imovina kupljena je po početnoj cijeni  $R_0$  i prati predodređenu stopu rasta tijekom vremena. Primjer takve imovine može biti obveznica. Nerizična imovina može biti opisana običnom diferencijalnom jednačbom:

$$dR_t = rR_t dt$$

pri čemu je  $r$  fiksna kamatna stopa na imovinu. Uzimanjem  $R_0 = 1$ , rješenje jednačbe dano je s  $R_t = e^{rt}$  za  $t > 0$ .

Druga imovina na našem tržištu je rizična imovina cijene  $S_t$  u trenutku  $t$ . Rizičnu imovinu možemo promatrati kao dionicu ili indeks dionice. U našem modelu, kretanje cijene rizične imovine možemo rastaviti na dvije komponente. Takva imovina slijedi parcijalnu diferencijalnu jednačbu:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t.$$

gdje je  $\mu \in \mathbb{R}$  srednja stopa povrata, a  $\sigma > 0$  konstantna volatilitnost. Alternativno, tu jednačbu možemo zapisati u integralnom obliku:

$$S_t = S_0 + \mu \int_0^t S_s ds + \sigma \int_0^t S_s dW_s$$

gdje je drugi integral Itôv integral, a  $S_0 \geq 0$  početna cijena rizične imovine. Parametar  $\sigma$  može biti procijenjen kao standardna devijacija dnevnih povrata. Nažalost, pretpostavka o konstantnoj volatilitnosti tijekom vremena je nerealna. Općenito, srednju stopu povrata  $\mu$  i konstantnu volatilitnost  $\sigma$  možemo zamijeniti odgovarajućim slučajnim procesima  $(\mu(t, S_t); t \geq 0)$  i  $(\sigma(t, S_t); t \geq 0)$  pa je cijena rizične imovine dana stohastičkom diferencijalnom jednačbom:

$$dS_t = \mu(t, S_t) dt + \sigma(t, S_t) dW_t.$$

**Definicija 2.2.1.** *Portfelj ili strategija je  $\mathbb{F}$ -adaptiran slučajan proces  $\Phi = ((\phi_t^0, \phi_t^1); t \in [0, T])$  pri čemu je  $\phi_t^0$  količina novca ili obveznica u trenutku  $t$ , a  $\phi_t^1$  količina dionica u trenutku  $t$ . Vrijednost portfelja u trenutku  $t$  dana je sa:*

$$V_t^\Phi = \phi_t^0 R_t + \phi_t^1 S_t.$$

**Definicija 2.2.2.** *Kažemo da je portfelj  $\Phi = ((\phi_t^0, \phi_t^1); t \in [0, T])$  samofinancirajući ako je  $\int_0^T |\phi_t^0| dt + \int_0^T |\phi_t^1|^2 dt < \infty$   $\mathbb{P}$ -g.s. i za sve  $t \in [0, T]$  vrijedi:*

$$V_t^\Phi = V_0^\Phi + \int_0^t \phi_s^0 dR_s + \int_0^t \phi_s^1 dS_s \quad \mathbb{P} - g.s.$$

# Poglavlje 3

## Hestonov model za europske opcije

### 3.1 Dinamika modela

Neka su  $W^{(1)} = (W_t^{(1)}; t \geq 0)$  i  $W^{(2)} = (W_t^{(2)}; t \geq 0)$  Brownova gibanja na vjerojatnosnom prostoru  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  obzirom na filtraciju  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t; t \geq 0)$ . Hestonov model pretpostavlja da osnovna cijena dionice,  $S = (S_t; t \geq 0)$ , slijedi Black-Scholesov tip slučajnog procesa, a stohastička varijanca  $\nu = (\nu_t; t \geq 0)$  Cox-Ingersoll-Rossov proces. Stoga je Hestonov model prikazan pomoću bivarijantnog sustava stohastičkih diferencijalnih jednačbi:

$$\begin{aligned} dS_t &= \mu S_t dt + \sqrt{\nu_t} S_t dW_t^{(1)} \\ d\nu_t &= \kappa(\theta - \nu_t) dt + \sigma \sqrt{\nu_t} dW_t^{(2)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdje je  $\mathbb{E}[W_t^{(1)} W_t^{(2)}] = \rho t$ . Zbog činjenice da je  $\nu_t$  uvijek nenegativno stohastičke diferencijalne jednačbe imaju smisla. Pogledamo li heuristički, kada  $\nu_t \rightarrow 0$  prvi se dio druge jednačbe u (3.1) povećava, drift postaje jako pozitivan te gura proces u suprotnom smjeru, odnosno u pozitivnom smjeru, dalje od 0. Model (3.1) određen je sljedećim parametrima:

- $\mu$  drift dionice;
- $\kappa > 0$  srednja brzina obrtaja za varijancu;
- $\theta > 0$  srednja razina obrtaja za varijancu;
- $\sigma > 0$  volatilitnost varijance;
- $\nu_0 > 0$  početna razina varijance;
- $S_0 > 0$  početna razina (cijena) dionice;
- $\rho \in [-1, 1]$  korelacija između dva Brownova gibanja  $W^{(1)}$  i  $W^{(2)}$ .

Neki autori  $\nu_0$  ne promatraju kao parametar već kao slučajnu varijablu koja označava početno stanje jer volatilitnost ne možemo promatrati, već samo procijeniti. Uočimo da stohastičkim diferencijalnim jednađbama (3.1) modeliramo proces varijance  $\nu$ , a ne standardne devijacije, tj. volatilitnosti. Specijalno, proces varijance možemo modelirati pomoću Ornstein-Uhlenbeckovog procesa za volatilitnost definiranog stohastičkom diferencijalnom jednađbom:

$$dh_t = -\beta h_t dt + \delta dW_t^{(2)} \quad (3.2)$$

pri čemu su  $\beta, \delta > 0$ . Pretpostavimo li da standardna devijacija slijedi Ornstein-Uhlenbeckov proces definiran jednakošću (3.2), korištenjem formule iz Teorema 2.1.6 dobivamo stohastičku diferencijalnu jednađbu za volatilitnost:

$$d\nu_t = (\delta^2 - 2\beta\nu_t)dt + 2\delta\sqrt{\nu_t}dW_t^{(2)}.$$

Dobivena jednađba strukturom podsjeća na drugu jednađbu iz (3.1). Izjednačavanjem konstanti tako da vrijedi:  $\kappa = 2\beta$ ,  $\theta = \delta^2/(2\beta)$  te  $\sigma = 2\delta$  pomoću izvedene jednađbe dobivamo upravo stohastičku diferencijalnu jednađbu iz Hestonovog modela koja prikazuje kretanje volatilitnosti. Od sada nadalje pretpostavljamo da parametri  $\kappa$ ,  $\theta$  i  $\sigma$  zadovoljavaju tzv. Fellerov uvjet dan sa  $2\kappa\theta > \sigma^2$  koji osigurava da je proces varijance uvijek strogo pozitivan.

Cijena dionica i varijanica slijede proces (3.1) uz povijesnu mjeru  $\mathbb{P}$ , poznatu kao fizička mjera. U svrhu određivanja cijena izvedenica, potrebno je odrediti razdiobu dvodimenzionalnog slučajnog procesa  $(S, \nu)$  obzirom na mjeru neutralnu na rizik. Prisjetimo se, mjera neutralna na rizik ili martingalna mjera je ona mjera s obzirom na koju je očekivanje diskontirane vrijednosti imovine u trenutku  $t$ , uvjetno na  $\mathcal{F}_s$  jednako cijeni diskontirane imovine u trenutku  $s$ , odnosno zapisano matematički:

$$\widetilde{S}_s^i = \mathbb{E}^* [\widetilde{S}_t^i | \mathcal{F}_s]$$

za svaki  $s < t$ . Heston zaključuje da je prostor ekvivalentnih martingalnih mjera  $\mathcal{P}$  neprazan te da ekvivalentna martingalna mjera nije jedinstvena. Kako bismo pronašli mjeru obzirom na koju je diskontirana cijena dionice martingalna; potrebno je pronaći procese koji transformiraju Brownova gibanja  $W^{(i)} = (W_t^{(i)}; t \geq 0)$  u druga dva Brownova gibanja;  $\widetilde{W}^{(i)} = (\widetilde{W}_t^{(i)}; t \geq 0)$  za  $i = 1, 2$ . Ta je mjera  $\mathbb{Q}$  određena 2-dimenzionalnim adaptiranim slučajnim procesom  $\Theta = (\theta_t; t \geq 0) = ((\theta_t^{(1)}, \theta_t^{(2)}); t \geq 0)$  iz Girsanovljevog teorema. Budući da su nam za primjenu Girsanovljevog dvodimenzionalnog teorema, Teorem 2.1.8, potrebna dva nezavisna Brownova gibanja koristimo transformaciju dvaju nezavisnih Brownovih gibanja  $B^{(1)} = (B_t^{(1)}; t \geq 0)$  i  $B^{(2)} = (B_t^{(2)}; t \geq 0)$ . Zbog dekompozicije Choleskog vrijedi:

$$(W^{(1)}, W^{(2)}) \stackrel{d}{=} (\rho B^{(1)} + \sqrt{1 - \rho^2} B^{(2)}, B^{(1)}) \quad (3.3)$$



budući da vrijedi:

$$\mathbb{E}[(\rho B_t^{(1)} + \sqrt{1 - \rho^2} B_t^{(2)}) B_t^{(1)}] = \mathbb{E}[\rho (B_t^{(1)})^2] + \sqrt{1 - \rho^2} \mathbb{E}[B_t^{(2)} B_t^{(1)}] = \rho t.$$

Heston najprije definira  $\widetilde{W}_t^{(1)}$  sa:

$$\widetilde{W}_t^{(1)} = W_t^{(1)} + \frac{\mu - r}{\sqrt{v_t}} t. \quad (3.4)$$

Koristeći jednakost (3.4) zaključujemo da je proces cijena dionica u formi mjere neutralne na rizik zadan sa:

$$dS_t = rS_t dt + \sqrt{v_t} S_t d\widetilde{W}_t^{(1)}. \quad (3.5)$$

Tada kretanje diskontirane cijene dionica slijedi stohastičku diferencijalnu jednađbu:

$$d\widetilde{S}_t = \sqrt{v_t} \widetilde{S}_t d\widetilde{W}_t^{(1)}.$$

Navedeni je proces Itôv integral pa je samim time i martingal, dakle pronašli smo ekvivalentnu martingalnu mjeru. Kako bi pronašli još jednu ekvivalentnu martingalnu mjeru prateći Hestona definiramo  $\widetilde{W}_t^{(2)}$  sa:

$$\widetilde{W}_t^{(2)} = W_t^{(2)} + \frac{\lambda(S_t, v_t, t)}{\sigma \sqrt{v_t}}. \quad (3.6)$$

Za  $\widetilde{W}_t^{(2)}$  vrijedi da je oblika:

$$\widetilde{W}_t^{(2)} = B_t^{(1)} + \int_0^t \theta_u^{(1)} du = W_t^{(2)} + \int_0^t \theta_u^{(1)} du.$$

Ponekad je jednostavnije promatati proces logaritamskih cijena kao kod geometrijskog Brownovog gibanja. Stohastička diferencijalna jednađba za proces logaritamskih cijena dana je sa:

$$d \ln S_t = (\mu - \frac{1}{2} v_t) dt + \sqrt{v_t} dW_t^{(1)}.$$

Proces neutralan na rizik za logaritamske cijene dan je sa:

$$d \ln S_t = (r - \frac{1}{2} v_t) dt + \sqrt{v_t} d\widetilde{W}_t^{(1)}. \quad (3.7)$$

Ako dionica isplaćuje kontinuirani prinos od dividende,  $q$ , u jednađbama (3.5) i (3.7)  $r$  zamjenjujemo sa  $r - q$ . Proces neutralan na rizik za varijancu možemo dobiti uvođenjem

slučajne varijable  $\lambda(S_t, v_t, t)$  (slučajnog procesa  $(\lambda(S_t, v_t, t); t \geq 0)$ ) u stohastičku diferencijalnu jednađbu za  $v_t$  na sljedeći način

$$dv_t = [\kappa(\theta - v_t) - \lambda(S_t, v_t, t)]dt + \sigma \sqrt{v_t} d\widetilde{W}_t^{(2)}. \quad (3.8)$$

Funkciju  $\lambda(S_t, v_t, t)$  zovemo premija volatilnosti rizika. Može se pokazati da se premija volatilnosti rizika može odabrati kao afina transformacija volatilnosti te ju možemo zapisati kao  $\lambda(S, v, t) = \lambda v_t$ , pri čemu je  $\lambda > 0$  konstanta. Supstitucijom  $\lambda v_t$  u jednađbi (3.8) dobivamo Itôv proces obzirom na mjeru neutralnu na rizik  $\mathbb{Q}$ :

$$dv_t = \kappa^*(\theta^* - v_t)dt + \sigma \sqrt{v_t} d\widetilde{W}_t^{(2)}$$

pri čemu su  $\kappa^* = \kappa + \lambda$  te  $\theta^* = \kappa\theta/(\kappa + \lambda)$  parametri neutralni na rizik za proces varijance. Dakle, dobivamo nov prikaz Hestonovog modela:

$$\begin{aligned} dS_t &= rS_t dt + \sqrt{v_t} S_t d\widetilde{W}_t^{(1)} \\ dv_t &= \kappa^*(\theta^* - v_t)dt + \sigma \sqrt{v_t} d\widetilde{W}_t^{(2)} \end{aligned}$$

pri čemu je  $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\widetilde{W}_t^{(1)} \widetilde{W}_t^{(2)}] = \rho t$ . Ovaj sustav zadovoljava formu bivarijatnog sustava stohastičkih diferencijalnih jednađbi (3.1) obzirom na mjeru neutralnu na rizik  $\mathbb{Q}$ .

Ako je  $\lambda = 0$ , dobivamo  $\kappa^* = \kappa$  te  $\theta^* = \theta$  odnosno ti su parametri jednaki bez obzira gledamo li mjeru neutralnu na rizik ili fizičku mjeru. Budući da je parametar  $\lambda$  ugniježđen u  $\kappa^*$  i  $\theta^*$  kada procijenimo parametre neutralne na rizik za cijene opcija već smo procijenili i  $\lambda$ .

## 3.2 Svojstva procesa varijance

Rezultati vezani za osnovna svojstva te svojstva varijance korištena u ovom potpoglavlju mogu se pronaći u [2]. Svojstva varijance  $v_t$  uvjetno na realizaciju  $v_s$  za  $s < t$  mogu se odrediti korištenjem činjenice da je uvjetna distribucija slučajne varijable  $2c_t v_t$  uvjetno na  $v_s$  jednaka  $\chi^2$ -distribuciji s  $d = 4\kappa\theta/\sigma^2$  stupnjeva slobode i parametrom necentriranosti  $2c_t v_s e^{-\kappa(t-s)}$ , pri čemu je

$$c_t = \frac{2\kappa}{\sigma^2(1 - e^{-\kappa(t-s)})}.$$

Očekivanje i varijanca od  $v_t$ , uvjetno na vrijednost  $v_s$  dane su sa:

$$\begin{aligned} m_{t,s} &= \mathbb{E}[v_t | v_s] = \theta + (v_s - \theta)e^{-\kappa(t-s)} \\ \Sigma_{t,s}^2 &= \text{Var}[v_t | v_s] = \frac{v_s \sigma^2 e^{-\kappa(t-s)}}{\kappa} (1 - e^{-\kappa(t-s)}) + \frac{\theta \sigma^2}{2\kappa} (1 - e^{-\kappa(t-s)})^2 \end{aligned}$$

pri čemu je detaljniji izvod moguće pronaći u [5, Chapter 1].

Kada  $\kappa \rightarrow \infty$  očekivanje  $m$  se približava srednjoj razini obrtaja  $\theta$ , a varijanca  $\Sigma^2$  se približava 0. Kada  $\kappa \rightarrow 0$  očekivanje se približava trenutnoj razini varijance,  $\nu_s$ , a varijanca se približava  $\sigma^2 \nu_s(t-s)$ . Kada  $t \rightarrow \infty$  javlja se svojstvo vraćanja prema srednjemu odnosno *mean-reverting property* te očekivanje teži srednjoj razini obrtaja  $\theta$  za varijancu.

### 3.3 Cijena europske call opcije

Cijena europske call opcije u Hestonovu modelu može biti prikazana slično kao u Black-Scholesovu modelu. Neka je  $\tau = T - t$ . Cijena europske call opcije na dionicu u trenutku  $t$  koja ne isplaćuje dividendu sa trenutnom cijenom  $S_t$ , cijenom izvršenja  $K$  i vremenom dospijeca  $T$ , je diskontirana očekivana vrijednost isplate obzirom na mjeru neutralnu na rizik  $\mathbb{Q}$

$$\begin{aligned} C(K) &= e^{-r\tau} \mathbb{E}[(S_T - K)^+ | \mathcal{F}_t] \\ &= e^{-r\tau} \mathbb{E}[(S_T - K)1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] \\ &= e^{-r\tau} \mathbb{E}[S_T 1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] - K e^{-r\tau} \mathbb{E}[1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] \\ &= S_t P_1 - K e^{-r\tau} P_2 \end{aligned} \tag{3.9}$$

pri čemu je  $1_A$  karakteristična funkcija događaja  $A$ , dok  $P_1$  i  $P_2$  predstavljaju oznake za  $P_1 = e^{-r\tau} \mathbb{E}[\frac{S_T}{S_t} 1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t]$ ,  $P_2 = \mathbb{E}[1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t]$ . Jednakost (3.9) vrijedi i u Black-Scholes-Mertonovom modelu, pri čemu je  $P_1 = \Phi(d_1)$  te  $P_2 = \Phi(d_2)$ , dok su  $d_1, d_2$  su definirani sa:

$$d_{1,2}(\tau, x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{\tau}} \left[ \log \frac{S_t}{K} + (r \pm \frac{1}{2} \sigma^2) \tau \right].$$

Uvedene su oznake  $P_1$  i  $P_2$  pri čemu  $P_2$  predstavlja vjerojatnost opcije koja istječe u novac dok je  $P_1$  očekivanje od  $S_T/S_t$  na događaju na kojemu opcija istječe u novac.

Neka su od sada slučajni procesi  $W^{(1)} = (W_t^{(1)}; t \geq 0)$  te  $W^{(2)} = (W_t^{(2)}; t \geq 0)$  Brownova gibanja s obzirom na mjeru neutralnu na rizik  $\mathbb{Q}$  i  $\mathbb{E}$  očekivanje s obzirom na  $\mathbb{Q}$ . Tada možemo pisati:

$$\mathbb{E}[1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] = \mathbb{Q}(S_T > K | \mathcal{F}_t) = \mathbb{Q}(\ln S_T > \ln K | \mathcal{F}_t) = P_2.$$

Procjena  $e^{-r\tau} \mathbb{E}[S_T 1_{\{S_T > K\}}]$  zahtjeva promjenu mjere iz  $\mathbb{Q}$  u mjeru  $\mathbb{Q}^S$ . Želimo definirati mjeru  $\mathbb{Q}^S$  tako da je  $\mathbb{Q}^S(A) = \mathbb{E}[S_T 1_A]$  za svaki  $A \in \mathcal{F}_T$  te koristimo Radon-Nikodymovu derivaciju:

$$\frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{Q}^S} = \frac{R_T/R_t}{S_T/S_t} \tag{3.10}$$

pri čemu je  $R_t = \exp(\int_0^t r du) = e^{rt}$ . Prvi izraz u zadnjem redu od (3.9) možemo zapisati kao:

$$\begin{aligned} e^{-r(T-t)}\mathbb{E}[S_T 1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] &= S_t \mathbb{E}\left[\frac{S_T/S_t}{R_T/R_t} 1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t\right] = S_t \mathbb{E}^{\mathbb{Q}^S}\left[\frac{S_T/S_t}{R_T/R_t} 1_{\{S_T > K\}} \frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{Q}^S} | \mathcal{F}_t\right] \\ &= S_t \mathbb{E}^{\mathbb{Q}^S}[1_{\{S_T > K\}} | \mathcal{F}_t] = S_t \mathbb{Q}^S(S_T > K | \mathcal{F}_t) = S_t P_1. \end{aligned}$$

Ovo implicira da cijena europske call opcije iz (3.9) može biti napisana kao

$$C(K) = S_t \mathbb{Q}^S(S_T > K | \mathcal{F}_t) - Ke^{-rt} \mathbb{Q}(S_T > K | \mathcal{F}_t). \quad (3.11)$$

### 3.4 Hestonova parcijalna diferencijalna jednačnja

Parcijalna diferencijalna jednačnja za Hestonov model poseban je slučaj parcijalnih diferencijalnih jednačnji za modele stohastičke volatilnosti. Kod Black-Scholesovog modela promatramo financijsko tržište na kojemu postoje dva financijska instrumenta; novac koji se ukamaćuje po neprekidnoj kamatnoj stopi te dionice čiju cijenu modeliramo pomoću geometrijskog Brownovog gibanja. Pravilnim odabirom izvedenice portfelj možemo učiniti bezrizičnim. Najprije promatramo portfelj  $\Pi$  kojega izvedenica  $V$  čini bezrizičnim:

$$\Pi = V + \Delta S.$$

U Hestonom je modelu potrebna dodatna izvedenica kako bi se zaštitili i od odstupanja volatilnosti te ponovno učinili portfelj bezrizičnim. Stoga, formiramo portfelj koji se sastoji od opcije  $V = V(S, v, t)$ ,  $\Delta$  jedinica dionica, te  $\varphi$  jedinica druge opcije  $U(S, v, t)$ . Vrijednost portfelja dana je sa:

$$\Pi = V + \Delta S + \varphi U. \quad (3.12)$$

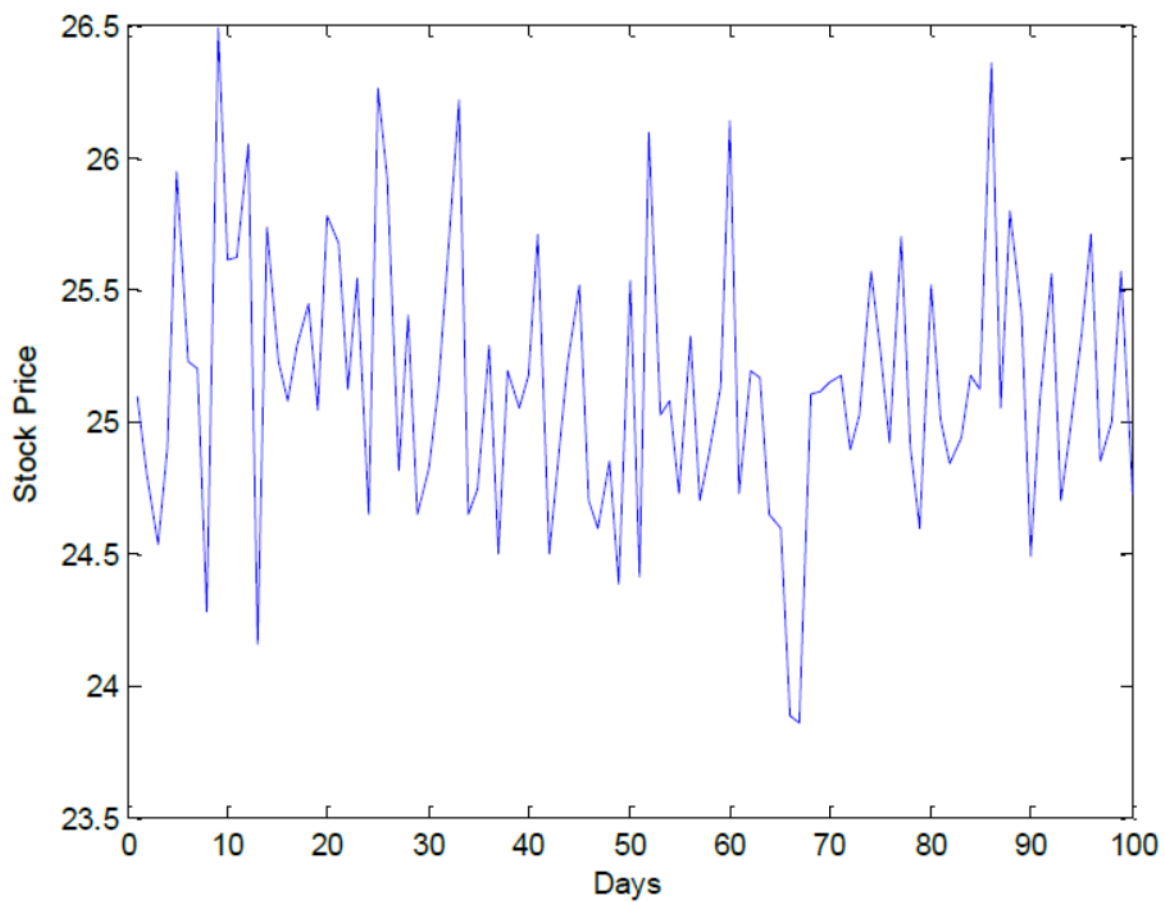
Pretpostavimo li da se portfelj samofinancira, promjena u vrijednosti portfelja dana je sa:

$$d\Pi = dV + \Delta dS + \varphi dU. \quad (3.13)$$

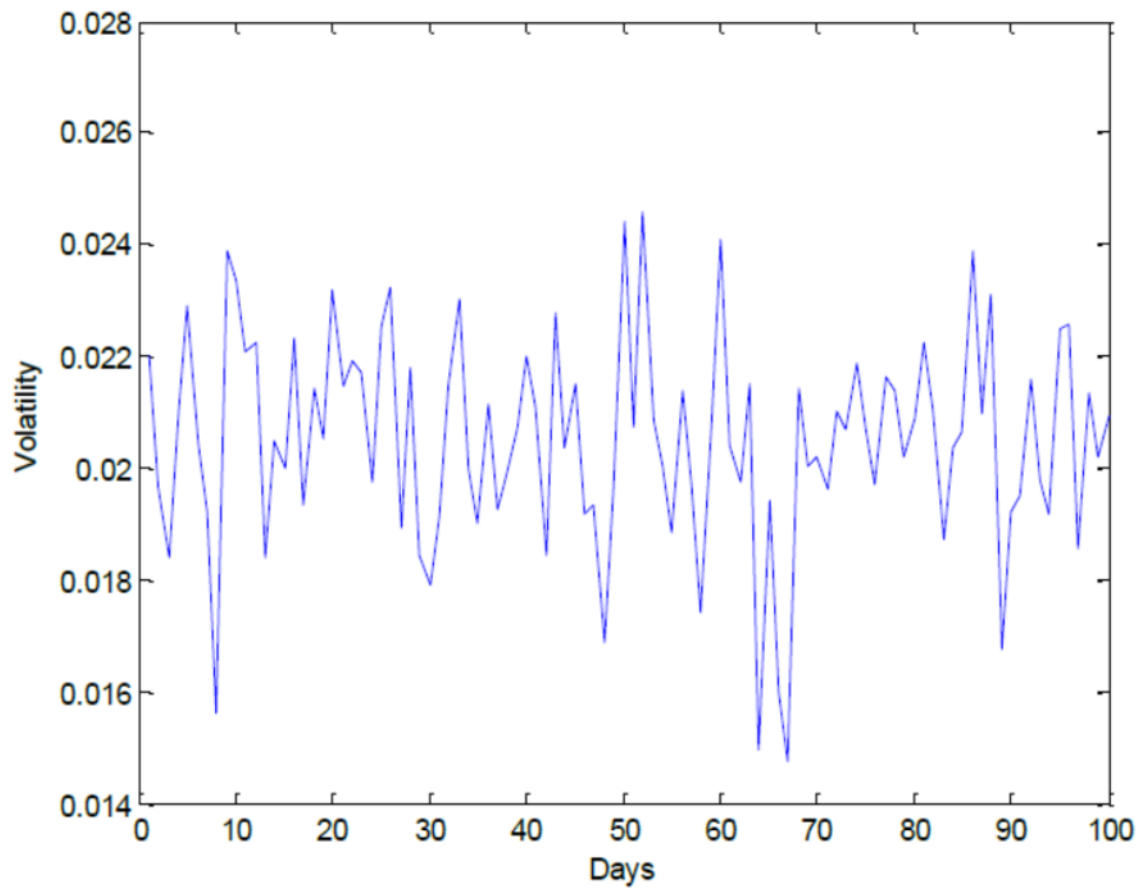
Strategija je slična strategiji korištenoj za Black-Scholesov model. Primjenjujemo generalizirani oblik Itôve leme kako bismo pronašli procese koji opisuju kretanje vrijednosti opcija  $U$  i  $V$  što kasnije koristimo za izvod procesa koji opisuje kretanje vrijednosti portfelja  $\Pi$ . Nakon toga tražimo vrijednosti parametara  $\Delta$  i  $\varphi$  uz koje je portfelj bezrizičan te taj rezultat koristimo za izvod Hestonove parcijalne diferencijalne jednačnje.

Izvođenje forme bezrizičnog portfelja započinjemo primjenom generaliziranog oblika Itôve leme na diferencijalni oblik  $V(S, v, t)$ . Korištenjem generalizirane Itôve formule za funkciju dvaju Itôvih procesa slijedi:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{\partial V}{\partial S} dS + \frac{\partial V}{\partial v} dv + \frac{1}{2} v S^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} dt + \frac{1}{2} v \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial v^2} dt + \sigma \rho v S \frac{\partial^2 V}{\partial S \partial v} dt \quad (3.14)$$



Slika 3.1: Dinamika cijena dionica u Hestonovom modelu. Slika je preuzeta iz [7, Figure 3.1.]



Slika 3.2: Dinamika volatilnosti u Hestonovom modelu. Slika je preuzeta iz [7, Figure 3.2.]

pri čemu smo koristili da je  $(dS)^2 = \nu S^2 (dW^{(1)})^2 = \nu S^2 dt$ ,  $(dv)^2 = \sigma^2 \nu dt$ ,  $dS dv = \sigma \nu S dW^{(1)} dW^{(2)} = \sigma \rho \nu S dt$ ,  $(dt)^2 = 0$ , te  $dW^{(1)} dt = dW^{(2)} dt = 0$ . Primjenom Itôve leme na diferencijalni oblik od  $U(S, \nu, t)$  dobivamo izraz jednak (3.14), ali po varijabli  $U$ . Uvrstimo li ta dva izraza u (3.13) promjena u vrijednosti portfelja može biti zapisana kao:

$$\begin{aligned}
d\Pi &= dV + \Delta dS + \varphi dU \\
&= \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \nu S^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + \rho \sigma \frac{\partial^2 V}{\partial \nu \partial S} + \frac{1}{2} \sigma^2 \nu \frac{\partial^2 V}{\partial \nu^2} \right] dt \\
&+ \varphi \left[ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \nu S^2 \frac{\partial^2 U}{\partial S^2} + \rho \sigma \nu S \frac{\partial^2 U}{\partial \nu \partial S} + \frac{1}{2} \sigma^2 \nu \frac{\partial^2 U}{\partial \nu^2} \right] dt \\
&+ \left[ \frac{\partial V}{\partial S} + \rho \frac{\partial U}{\partial S} + \Delta \right] dS + \left[ \frac{\partial V}{\partial \nu} + \varphi \frac{\partial U}{\partial \nu} \right] dv.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Kako bi portfelj bio zaštićen od kretanja tržišta i volatilnosti, posljednja dva izraza u (3.15) moraju biti jednaki nula. Iz toga zaključujemo da su parametri definirani sa:

$$\varphi = -\frac{\partial V}{\partial \nu} / \frac{\partial U}{\partial \nu}, \quad \Delta = -\rho \frac{\partial U}{\partial S} - \frac{\partial V}{\partial S}.$$

Uvrstimo li dobivene vrijednosti parametara  $\varphi$  i  $\Delta$  u (3.15) dobivamo:

$$\begin{aligned}
d\Pi &= \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \nu S^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + \rho \sigma \nu S \frac{\partial^2 V}{\partial S \partial \nu} + \frac{1}{2} \sigma^2 \nu \frac{\partial^2 V}{\partial \nu^2} \right] dt \\
&+ \varphi \left[ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \nu S^2 \frac{\partial^2 U}{\partial S^2} + \rho \sigma \nu S \frac{\partial^2 U}{\partial S \partial \nu} + \frac{1}{2} \sigma^2 \nu \frac{\partial^2 U}{\partial \nu^2} \right] dt
\end{aligned}$$

Što kraće možemo pisati kao  $d\Pi = (A + \varphi B)dt$ . Budući da kretanje vrijednosti portfelja gledamo s obzirom na bezrizičnu kamatnu stopu, promjenu u vrijednosti portfelja možemo zapisati kao  $d\Pi = r\Pi dt$ . Koristeći jednakost (3.12) imamo  $A + \varphi B = r(V + \Delta S + \varphi U)$  iz čega ponovno slijedi:

$$\frac{A - rV + rS \frac{\partial V}{\partial S}}{\frac{\partial V}{\partial \nu}} = \frac{B - rU + rS \frac{\partial U}{\partial S}}{\frac{\partial U}{\partial \nu}}. \tag{3.16}$$

Pogledamo li bolje jednadžbu, možemo vidjeti da je lijeva strana funkcija od  $V$ , dok je desna strana jednadžbe (3.16) funkcija od  $U$ . Pomoću izvoda iz [5, Chapter 1] vidimo da obje strane mogu biti zapisane kao funkcija više varijabli,  $f(S, \nu, t)$  zadana sa:

$$f(S, \nu, t) = -\kappa(\theta - \nu) + \lambda(S, \nu, t)$$

pri čemu je  $\lambda(S, \nu, t)$  premija volatilnosti rizika. Koristeći činjenicu da je premija volatilnosti rizika afina transformacija volatilnosti;  $\lambda(S, \nu, t) = \lambda \nu$  supstitucijom funkcije  $f(S, \nu, t)$

u lijevu stranu jednadžbe (3.16) dobivamo:

$$-\kappa(\theta - v) + \lambda(S, v, t) = \frac{\left[ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2}vS^2 \frac{\partial^2 U}{\partial S^2} + \rho\sigma vS \frac{\partial^2 U}{\partial S \partial v} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 U}{\partial v^2} \right] - rU + rS \frac{\partial U}{\partial S}}{\frac{\partial U}{\partial v}}.$$

Posložimo faktore kako bismo dobili Hestonovu parcijalnu diferencijalnu jednadžbu u varijabli cijene  $S$ :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2}vS^2 \frac{\partial^2 U}{\partial S^2} + \rho\sigma vS \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial S} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 U}{\partial v^2} - rU + rS \frac{\partial U}{\partial S} + [\kappa(\theta - v) - \lambda(S, v, t)] \frac{\partial U}{\partial v} = 0. \quad (3.17)$$

Granični uvjeti u jednadžbi vrijede za europsku call opciju s vremenom dospijeca  $T$  i cijenom izvršenja  $K$ . U trenutku dospijeca, vrijednost call opcije jednaka je unutarnjoj vrijednosti te je dana sa

$$U(S, v, T) = \max(0, S - K).$$

Kada je cijena dionice nula, call opcija je bezvrijedna. Za velike vrijednosti od  $S$  cijena opcije raste linearno. Cijena opcije se obično povećava s volatilnosti, no ograničena je cijenom dionice. Kada volatilnost postigne svoju najveću vrijednost, cijena opcije ima tendenciju postati jednaka cijeni dionice. To implicira tri granična uvjeta:

$$U(0, v, t) = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial S}(\infty, v, t) = 1, \quad U(S, \infty, t) = S.$$

Parcijalnu diferencijalnu jednadžbu (3.17) možemo zapisati kao

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \alpha U - rU = 0$$

pri čemu je

$$\begin{aligned} \alpha = rS \frac{\partial}{\partial S} + \frac{1}{2}vS^2 \frac{\partial^2}{\partial S^2} \\ + [\kappa(\theta - v) - \lambda(S, v, t)] \frac{\partial}{\partial v} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2}{\partial v^2} + \rho\sigma vS \frac{\partial^2}{\partial S \partial v} \end{aligned} \quad (3.18)$$

generator Hestonovog modela. Prvi dio u jednadžbi (3.18) je generator Black-Scholesovog modela, pri čemu je  $v = \sigma_{BS}^2$ , a  $\sigma_{BS}$  Black-Scholesova konstantna volatilnost.

Definiramo logaritamsku cijenu  $x = \ln S$  i izražavamo parcijalnu diferencijalnu jednadžbu u varijablama  $(x, v, t)$  umjesto  $(S, v, t)$ . Dolazimo do jednostavnije forme parcijalne diferencijalne jednadžbe u kojoj se ne pojavljuje trenutna cijena  $S$ . Zbog lančanog pravila vrijedi:

$$\frac{\partial U}{\partial S} = \frac{\partial U}{\partial x} \frac{1}{S}, \quad \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial S} = \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{1}{S} \frac{\partial U}{\partial x} \right) = \frac{1}{S} \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial x}.$$



Zbog pravila produkta vrijedi:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial S^2} = \frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{1}{S} \frac{\partial U}{\partial x} \right) = -\frac{1}{S^2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{S} \frac{\partial^2 U}{\partial S \partial x} = -\frac{1}{S^2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{S^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}.$$

Uvrštavanjem ovih izraza u Hestonovu parcijalnu diferencijalnu jednadžbu (3.17) svi izrazi sa  $S$  nestaju te dobivamo Hestonovu parcijalnu diferencijalnu jednadžbu u terminima logaritamske cijene  $x = \ln S$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} v \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (r - \frac{1}{2} v) \frac{\partial U}{\partial x} + \rho \sigma v \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial x} \\ + \frac{1}{2} \sigma^2 v \frac{\partial^2 U}{\partial v^2} - rU + [\kappa(\theta - v) - \lambda v] \frac{\partial U}{\partial v} = 0. \end{aligned} \quad (3.19)$$

### 3.5 Parcijalne diferencijalne jednadžbe za $P_1$ i $P_2$

Jednadžbu (3.11) možemo zapisati korištenjem  $x = x_t = \ln S_t$  te  $\tau = T - t$  u obliku

$$C(K) = e^x P_1 - K e^{-r\tau} P_2. \quad (3.20)$$

Ta jednadžba izražava cijenu europske call opcije  $C(K)$  u terminima vjerojatnosti pozitivnih isplata  $P_1 = \mathbb{Q}^S(S_T > K)$  te  $P_2 = \mathbb{Q}(S_T > K)$ . Budući da europska call opcija zadovoljava jednadžbu (3.19) potrebno je pronaći parcijalne derivacije jednadžbe (3.20) po varijablama, te izraziti parcijalnu diferencijalnu jednadžbu u terminima  $P_1$  i  $P_2$ .

Parcijalna derivacija cijene europske call opcije  $C(K)$  po  $t$  dana je sa

$$\frac{\partial C}{\partial t} = e^x \frac{\partial P_1}{\partial t} - K e^{-r\tau} \left[ -r P_2 + \frac{\partial P_2}{\partial t} \right].$$

Parcijalna derivacija po  $x$ :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = e^x \left[ P_1 + \frac{\partial P_1}{\partial x} \right] - K e^{-r\tau} \frac{\partial P_2}{\partial x}.$$

Druga parcijalna derivacija:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= e^x P_1 + 2e^x \frac{\partial P_1}{\partial x} + e^x \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} - K e^{-r\tau} \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} \\ &= e^x \left[ P_1 + 2 \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} \right] - K e^{-r\tau} \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2}. \end{aligned}$$

Parcijalno deriviramo po  $v$ :

$$\frac{\partial C}{\partial v} = e^x \frac{\partial P_1}{\partial v} - K e^{-r\tau} \frac{\partial P_2}{\partial v}, \quad \frac{\partial^2 C}{\partial v^2} = e^x \frac{\partial^2 P_1}{\partial v^2} - K e^{-r\tau} \frac{\partial^2 P_2}{\partial v^2}.$$

Parcijalno deriviramo po  $v$  i  $x$ :

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x \partial v} = e^x \left[ \frac{\partial P_1}{\partial v} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial x \partial v} \right] - K e^{-r\tau} \frac{\partial^2 P_2}{\partial x \partial v}.$$

Budući da je europska call opcija  $C(K)$  financijska izvedenica, ona zadovoljava Hestonovu parcijalnu diferencijalnu jednačbu (3.19) koju možemo zapisati u varijabli  $C(K)$ :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{2}v \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \left( r - \frac{1}{2}v \right) \frac{\partial C}{\partial x} + \rho\sigma v \frac{\partial^2 C}{\partial v \partial x} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 C}{\partial v^2} - rC + [\kappa(\theta - v) - \lambda v] \frac{\partial C}{\partial v} = 0. \quad (3.21)$$

Hestonov model pretpostavlja da (3.21) vrijedi za sve vrijednosti europske call opcije  $C(K)$ , posebno i za svaku cijenu izvršenja  $K \geq 0$ , svaku cijenu dionice  $S_t \geq 0$  te svaku kamatnu stopu  $r \geq 0$ . Ako uzmemo  $K = 0$  i  $S_t = 1$  jednačba (3.9) daje opciju čija je cijena  $P_1$ . Ova će opcija također slijediti (3.21). Slično, uzmemo li  $S_t = 0$ ,  $K = 1$  i  $r = 0$  u (3.9) dobivamo opciju čija je cijena  $-P_2$ . Budući da za  $-P_2$  vrijedi parcijalna diferencijalna jednačba, ona vrijedi i za  $P_2$ .

Promatramo članove napisanih parcijalnih derivacija od  $C(K)$  koji u sebi sadrže  $P_1$ , dijeljenjem sa  $e^x$  te uvrštavanjem u jednačbu (3.21) dobivamo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{1}{2}v \left[ P_1 + 2 \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} \right] + \left( r - \frac{1}{2}v \right) \left[ P_1 + \frac{\partial P_1}{\partial x} \right] + \rho\sigma v \left[ \frac{\partial P_1}{\partial v} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial x \partial v} \right] \\ + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 P_1}{\partial v^2} - rP_1 + [\kappa(\theta - v) - \lambda v] \frac{\partial P_1}{\partial v} = 0. \end{aligned}$$

Pojednostavlivanjem izraza dobivamo:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} + \left( r + \frac{1}{2}v \right) \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{1}{2}v \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} + \rho\sigma v \frac{\partial^2 P_1}{\partial x \partial v} + [\rho\sigma v + \kappa(\theta - v) - \lambda v] \frac{\partial P_1}{\partial v} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 P_1}{\partial v^2} = 0. \quad (3.22)$$

Slično, promatranjem članova parcijalnih derivacija od  $C(K)$  koji u sebi sadrže  $P_2$ , dijeljenjem sa  $-Ke^{-r\tau}$  te uvrštavanjem u parcijalnu diferencijalnu jednačbu (3.21) slijedi:

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{1}{2}v \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} + \left( r - \frac{1}{2}v \right) \frac{\partial P_2}{\partial x} + \rho\sigma v \frac{\partial^2 P_2}{\partial v \partial x} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 P_2}{\partial v^2} + [\kappa(\theta - v) - \lambda v] \frac{\partial P_2}{\partial v} = 0. \quad (3.23)$$

Pojednostavljeno korištenjem indeksa  $j$  jednačbe (3.22) i (3.23) možemo zapisati kao

$$\frac{\partial P_j}{\partial t} + \rho\sigma v \frac{\partial^2 P_j}{\partial v \partial x} + \frac{1}{2}v \frac{\partial^2 P_j}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial^2 P_j}{\partial v^2} + (r + u_j v) \frac{\partial P_j}{\partial x} + (a - b_j v) \frac{\partial P_j}{\partial v} = 0 \quad (3.24)$$

za  $j = 1, 2$  pri čemu je  $u_1 = \frac{1}{2}$ ,  $u_2 = -\frac{1}{2}$ ,  $a = \kappa\theta$ ,  $b_1 = \kappa + \lambda - \rho\sigma$  te  $b_2 = \kappa + \lambda$ . Korištenjem tih stohastičkih diferencijalnih jednačbi lako je izvesti (3.21).

### 3.6 Hestonova funkcija

Rješenja jednadžbi (3.24) za  $j = 1, 2$  nije lako dobiti te zbog toga uvodimo pojam karakteristične funkcije. Kada su nam poznate karakteristične funkcije lako je odrediti vjerojatnosti pozitivnih isplata  $P_1$  i  $P_2$ . Neka je  $f_j$  za  $j = 1, 2$  karakteristična funkcija od  $\ln S_T$  uvjetno na  $x_t = \ln S_t$  i  $v_t$ , obzirom na vjerojatnost  $\mathbb{Q}$  za  $j = 2$  i s obzirom na vjerojatnost  $\mathbb{Q}^S$  za  $j = 1$ . Heston pretpostavlja da je uvjetna karakteristična funkcija za temeljnu cijenu dionice oblika:

$$f_j(\phi; x, v) = \exp(C_j(\tau, \phi) + D_j(\tau, \phi)v + i\phi x) \quad (3.25)$$

za  $j = 1, 2$  pri čemu je  $i = \sqrt{-1}$  imaginarna jedinica,  $C_j$  i  $D_j$  koeficijenti, a  $\tau = T - t$  vrijeme dospijea. Koristeći Gil-Pelaez inverzni teorem iz [4],  $P_j$  za  $j = 1, 2$  možemo zapisati kao:

$$P_j(x, v, \tau) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \operatorname{Re} \left[ \frac{e^{-i\varphi \log(K)} f_j(\varphi; x, v)}{i\varphi} \right] d\varphi$$

za  $j=1,2$ . Tada zbog Feynman-Kac teorema prikazanog u [5] vrijedi:

$$-\frac{\partial f_j}{\partial \tau} + \frac{1}{2}v \frac{\partial^2 f_j}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\sigma^2 v \frac{\partial f_j}{\partial v^2} + \rho\sigma v \frac{\partial^2 f_j}{\partial x \partial v} + (r - u_j v) \frac{\partial f_j}{\partial x} + (\kappa\theta - b_j v) \frac{\partial f_j}{\partial v} = 0. \quad (3.26)$$

Kako bismo riješili parcijalnu diferencijalnu jednadžbu, potrebno je izračunati parcijalne derivacije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_j}{\partial \tau} &= \left( \frac{\partial C_j}{\partial \tau} + \frac{\partial D_j}{\partial \tau} v \right) f_j, & \frac{\partial f_j}{\partial x} &= i\phi f_j, & \frac{\partial^2 f_j}{\partial x^2} &= i^2 \phi^2 = -\phi^2 f_j^2, \\ \frac{\partial f_j}{\partial v} &= D_j f_j, & \frac{\partial^2 f_j}{\partial v^2} &= D_j^2 f_j, & \frac{\partial^2 f_j}{\partial x \partial v} &= i\phi D_j f_j. \end{aligned}$$

Supstitucijom diferencijala u jednadžbu (3.26) te dijeljenjem jednakosti sa  $f_j$  dobivamo:

$$-\left( \frac{\partial C_j}{\partial \tau} + \frac{\partial D_j}{\partial \tau} v \right) + \rho\sigma v i\phi D_j - \frac{1}{2}v\phi^2 + \frac{1}{2}v\sigma^2 D_j^2 + (r + u_j v)i\phi + (\kappa\theta - b_j v)D_j = 0.$$

Faktore u gornjoj jednadžbi posložimo ovisno o tome imaju li uz sebe  $v$  ili nemaju:

$$v \left( -\frac{\partial D_j}{\partial \tau} + \rho\sigma i\phi D_j - \frac{1}{2}\phi^2 + \frac{1}{2}\sigma^2 D_j^2 + u_j i\phi - b_j D_j \right) + \left( -\frac{\partial C_j}{\partial \tau} + r i\phi + \kappa\theta D_j \right) = 0.$$

Budući da jednakost vrijedi za svaki  $v$  rastavom jednakosti te izjednačavanjem oba sumanda s nulom slijedi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_j}{\partial \tau} &= \rho\sigma i\phi D_j - \frac{1}{2}\phi^2 + \frac{1}{2}\sigma^2 D_j^2 + u_j i\phi - b_j D_j \\ \frac{\partial C_j}{\partial \tau} &= r i\phi + \kappa\theta D_j. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Uz početne uvjete  $D_j(0, \phi) = 0$  i  $C_j(0, \phi) = 0$  prva jednačba je Riccatijeva diferencijalna jednačba dok je druga obična diferencijalna te može biti riješena nakon uvrštavanja izraza za  $D_j$ .

Prvu jednačbu iz (3.27) možemo zapisati kao kvadratnu jednačbu:

$$\frac{\partial D_j}{\partial \tau} = \frac{1}{2}\sigma^2 D_j^2 + (\rho\sigma i\phi - b_j)D_j + \left(-\frac{1}{2}\phi^2 + u_j i\phi\right).$$

Dodatno, uvodimo oznake:  $Z_j = \left(-\frac{1}{2}\phi^2 + u_j i\phi\right)$ ,  $Q_j = (-\rho\sigma i\phi + b_j)$ ,  $R_j = -\frac{1}{2}\phi^2 u_j i\phi$  pomoću kojih možemo pisati:

$$D_j' = Z_j - Q_j D_j + R_j D_j^2.$$

Koristeći Riccatijevu jednačbu uz supstituciju  $D_j = \frac{-w'}{R_j w}$  dobivamo:

$$w'' + Q_j w' + R_j = 0. \quad (3.28)$$

Karakteristična jednačba za (3.28) oblika je  $x^2 + Q_j x + R_j = 0$  s korijenima:

$$x_{1,2} = \frac{-Q_j \pm \sqrt{Q_j^2 - 4R_j}}{2}$$

te je rješenje za  $w$  dano sa  $w = K e^{x_1 \tau} + e^{x_2 \tau}$ . Uvrštavanjem rješenja od  $w$  u jednakost za  $D_j$  dobivamo:

$$D_j = -\frac{1}{R_j} \left( \frac{K x_1 e^{x_1 \tau} + x_2 e^{x_2 \tau}}{K e^{x_1 \tau} + e^{x_2 \tau}} \right).$$

Iz uvjeta  $D_j(0, \phi) = 0$  slijedi  $K = \frac{-x_2}{x_1}$ . Dobivamo rješenje za  $D_j$ :

$$D_j(\tau, \phi) = \frac{b_j - \rho\sigma i\phi + d_j}{\sigma^2} \left( \frac{1 - e^{d_j \tau}}{1 - g_j e^{d_j \tau}} \right)$$

pri čemu je:

$$d_j = \sqrt{(\rho\sigma i\phi - b_j)^2 - \sigma^2(2u_j i\phi - \phi^2)}$$

$$g_j = \frac{b_j - \rho\sigma i\phi + d_j}{b_j - \rho\sigma i\phi - d_j}.$$

Integriranjem druge jednakosti iz (3.27) dobivamo rješenje za  $C_j$ :

$$C_j = \int_0^\tau r i \phi dy + \kappa \theta \int_0^\tau D_j dy + c$$

gdje je  $c$  konstanta do koje možemo doći nakon integriranja i korištenja početnog uvjeta  $C_j(0, \phi) = 0$ . Rješenje dobivamo uvrštavanjem:

$$C_j = ri\phi\tau + \frac{\kappa\theta}{\sigma^2} \left[ (b_j - \rho\sigma i\phi + d_j)\tau - 2 \log \left( \frac{1 - g_j e^{d_j\tau}}{1 - g_j} \right) \right].$$

Nakon što smo dobili koeficijente karakteristične funkcije konačno ju možemo u cijelosti zapisati. Varijabla  $x$  predstavlja logaritamsku cijenu dionice,  $v$  je varijanca dok početnu vrijednost  $v_0$  moramo procijeniti.

### 3.7 Svojstva Hestonovog modela

Hestonov je model cijenjen i prepoznat kao značajan model za određivanje cijena izvedenica. Ipak, dolazi s ponekim manama.

Prednosti:

- Model dolazi u poluzatvorenoj formi za europsku call opciju koja je definirana formulom (3.20) te koja je posebice korisna kod kalibracije. U praksi, modeli određivanja cijena opcija dozvoljavaju velike brojeve. Važno je imati mogućnost brzog određivanja procijenjenih parametara kako bi proces trajao što kraće i zbog toga je poželjna poluzatvorena forma.
- Hestonov model nije određen pojedinom distribucijom kao što je primjera radi Black-Scholesov određen jediničnom normalnom.
- Krivulja volatilnosti poznata je u mnogim literaturama pod nazivom Volatility smile. Nakon rješavanja Hestonove parcijalne diferencijalne jednadžbe dobili smo ne-arbitražnu cijenu europske call opcije. Tu cijenu koristimo za računanje primijenjene volatilnosti koristeći Black-Scholesov model. Izgled krivulje primijenjene volatilnosti ovisi o predznaku korelacije. U slučaju da je korelacija jednaka nuli; volatilnost novca se smanjuje, a volatilnost izvan novca povećava. Pozitivna korelacija uzrokuje da je krivulja volatilnosti oblika parabole pozitivne orijentacije, dok negativna korelacija daje parabolu negativne orijentacije odnosno okrenutu prema dolje.
- Volatilnost ima svojstvo vraćanja prema srednjem što znači da se nakon pojave šokova u volatilnosti ona s vremenom vraća na početnu vrijednost, to dolazi od parametara srednjeg povrata koji se nalazi na našem tržištu.

Nedostaci:

- Glavni je problem uključiti kalibriranje modela. Zbog velike osjetljivosti početnih parametara rezultati dobiveni malim promjenama mogu značajno varirati.

- Diskretizacija može biti problematična kada se vrijednosti volatilnosti približavaju nuli ili u slučaju velikih vrijednosti volatilnosti. Zbog toga se rade posebne analize u slučaju kada je vrijednost u okolini nule.
- Model uključuje integriranje potencijalno velikih izraza što može dovesti do problema i divergencije integrala. Zbog toga je važno naglasiti poluzatvorenu formu koja uključuje integraciju.

## Poglavlje 4

# Rješavanje Heston-Riccatijeve jednadžbe

### 4.1 Riccatijeva jednadžba u općenitoj formi

Riccatijeva jednadžba ima važnu ulogu u rješavanju problema vezanih za financijsku matematiku, te također daje algoritam za klasifikaciju zatvorenih rješenja. Razlomljena Riccatijeva jednadžba poznata je kao dio rješenja za Hestonovu karakterističnu funkciju zbog svoje eksplicitne forme te je potrebno osloniti se na numeričke metode kako bih se došlo do rješenja. Riccatijeva jednadžba za  $y(t)$  s koeficijentima  $P(t)$ ,  $Q(t)$  i  $R(t)$  definirana je sa

$$\frac{dy(t)}{dt} = P(t) + Q(t)y(t) + R(t)y(t)^2.$$

Jednadžba može biti riješena uzimajući u obzir sljedeću diferencijalnu jednadžbu drugog reda:

$$w'' - \left[ \frac{P'}{P} + Q \right] w' + PRw = 0 \quad (4.1)$$

što možemo zapisati kao  $w'' + bw' + cw = 0$ . Rješenje jednadžbe (4.1) zadovoljava sljedeću jednakost:

$$y(t) = -\frac{w'(t)}{w(t)} \frac{1}{R(t)}.$$

Ovu diferencijalnu jednadžbu možemo riješiti pomoću kvadratne jednadžbe  $r^2 + br + c = 0$ , koja ima dva rješenja;  $\alpha$  i  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}, \quad \beta = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2}.$$

Rješenje obične diferencijalne jednačbe drugog reda (4.1) dano je sa

$$w(t) = Me^{\alpha t} + Ne^{\beta t}$$

pri čemu su M i N konstante. Rješenje Riccati jeve jednačbe tada je jednako

$$y(t) = -\frac{M\alpha e^{\alpha t} + N\beta e^{\beta t}}{Me^{\alpha t} + Ne^{\beta t}} \frac{1}{R(t)}.$$

Iz jednakosti (3.27) zaključujemo da Hestonova Riccati jednačba može biti zapisana kao:

$$\frac{\partial D_j}{\partial \tau} = P_j - Q_j D_j + R D_j^2 \quad (4.2)$$

pri čemu su

$$P_j = u_j i \phi - \frac{1}{2} \phi^2, \quad Q_j = b_j - \rho \sigma i \phi, \quad R = \frac{1}{2} \sigma^2$$

za  $j = 1, 2$ . Pripadajuća diferencijalna jednačba drugog reda je

$$w'' + Q_j w' + P_j R w = 0$$

te  $D_j = -\frac{1}{R} \frac{w'}{w}$ . Pomoćna jednačba  $r^2 + Q_j r + P_j R = 0$  ima korijene:

$$\alpha_j = \frac{-Q_j + \sqrt{Q_j^2 - 4P_j R}}{2} = \frac{-Q_j + d_j}{2}$$

$$\beta_j = \frac{-Q_j - \sqrt{Q_j^2 - 4P_j R}}{2} = \frac{-Q_j - d_j}{2}$$

$$d_j = \alpha_j - \beta_j = \sqrt{Q_j^2 - 4P_j R} = \sqrt{(\rho \sigma i \phi - b_j)^2 - \sigma^2(2u_j i \phi - \phi^2)}.$$

Rješenje Hestonove Riccati jednačbe tada je:

$$D_j = -\frac{1}{R} \frac{w'}{w} = -\frac{1}{R} \left( \frac{M\alpha_j e^{\alpha_j \tau} + N\beta_j e^{\beta_j \tau}}{Me^{\alpha_j \tau} + Ne^{\beta_j \tau}} \right) = -\frac{1}{R} \left( \frac{H\alpha_j e^{\alpha_j \tau} + \beta_j e^{\beta_j \tau}}{He^{\alpha_j \tau} + e^{\beta_j \tau}} \right) \quad (4.3)$$

pri čemu je  $H = M/N$ . Inicijalni uvjet  $D_j(0, \phi) = 0$  implicira da, kada  $\tau = 0$  uvrstimo u (4.3), brojnik postaje  $H\alpha + \beta = 0$ , iz čega slijedi  $H = -\beta/\alpha$ . Rješenje  $D_j$  postaje:

$$D_j = -\frac{\beta_j}{R} \left( \frac{-e^{\alpha_j \tau} + e^{\beta_j \tau}}{-g_j e^{\alpha_j \tau} + e^{\beta_j \tau}} \right) = -\frac{\beta_j}{R} \left( \frac{1 - e^{d_j \tau}}{1 - g_j e^{d_j \tau}} \right) = \frac{Q_j + d_j}{2R} \left( \frac{1 - e^{d_j \tau}}{1 - g_j e^{d_j \tau}} \right)$$

pri čemu je

$$g_j = -H = \frac{\beta_j}{\alpha_j} = \frac{b_j - \rho \sigma i \phi + d_j}{b_j - \rho \sigma i \phi - d_j} = \frac{Q_j - d_j}{Q_j + d_j}.$$



Rješenje za  $D_j$  stoga možemo pisati kao

$$D_j(\tau, \phi) = \frac{b_j - \rho\sigma i\phi + d_j}{\sigma^2} \left( \frac{1 - e^{d_j\tau}}{1 - g_j e^{d_j\tau}} \right).$$

Rješenje  $C_j$  dobivamo integriranjem druge jednadžbe u (3.27):

$$C_j = \int_0^\tau ri\phi dy + a \left( \frac{Q_j + d_j}{\sigma^2} \right) \int_0^\tau \left( \frac{1 - e^{d_j y}}{1 - g_j e^{d_j y}} \right) dy + H_1 \quad (4.4)$$

pri čemu je  $H_1$  konstanta. Prvi integral jednak je  $ri\phi\tau$ , a drugi može biti riješen koristeći supstituciju  $x = \exp(d_j y)$  iz koje slijedi  $dx = d_j \exp(d_j y) dy$  i  $dy = dx/(x d_j)$ . Jednadžba (4.4) postaje

$$C_j = ri\phi\tau + \frac{a}{d_j} \left( \frac{Q_j + d_j}{\sigma^2} \right) \int_1^{\exp(d_j\tau)} \left( \frac{1 - x}{1 - g_j x} \right) \frac{1}{x} dx + H_1 \quad (4.5)$$

gdje je  $a = \kappa\theta$ . Integral u (4.5) možemo dobiti rastavljanjem na parcijalne razlomke integranda

$$\begin{aligned} \int_1^{\exp(d_j\tau)} \frac{1 - x}{x(1 - g_j x)} dx &= \int_1^{\exp(d_j\tau)} \left[ \frac{1}{x} - \frac{1 - g_j}{1 - g_j x} \right] dx \\ &= \left[ \ln x + \frac{1 - g_j}{g_j} \ln(1 - g_j x) \right] \Big|_{x=1}^{x=\exp(d_j\tau)} \\ &= \left[ d_j\tau + \frac{1 - g_j}{g_j} \ln\left( \frac{1 - g_j e^{d_j\tau}}{1 - g_j} \right) \right]. \end{aligned}$$

Ponovnom supstitucijom integrala u (4.5) dobivamo rješenje za  $C_j$ :

$$C_j(\tau, \phi) = ri\phi\tau + \frac{a}{\sigma^2} \left[ (b_j - \rho\sigma i\phi + d_j)\tau - 2 \ln\left( \frac{1 - g_j e^{d_j\tau}}{1 - g_j} \right) \right] \quad (4.6)$$

pri čemu smo koristili inicijalni uvjet  $C_j(0, \theta) = 0$  iz kojeg slijedi  $H_1 = 0$ .

## 4.2 Prinos od dividende i cijena put opcije

Ako pretpostavimo da je isplata dividendi kontinuirana, možemo ih uključiti u naš model. U tom slučaju,  $r$  zamjenjujemo sa  $r - q$  u jednadžbi (3.5) te dobivamo

$$dS_t = (r - q)S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dW_t^{(1)}.$$

Rješenje za  $C_j$  u jednadžbi (4.6) postaje

$$C_j = (r - q)i\phi\tau + \frac{\kappa\phi}{\sigma^2} \left[ (b_j - \rho\sigma i\phi + d_j)\tau - 2 \ln \left( \frac{1 - g_j e^{d_j\tau}}{1 - g_j} \right) \right].$$

Da bi dobili cijenu europske put opcije  $P(K)$  u trenutku  $t$  najprije računamo cijenu europske call opcije  $C(K)$  u trenutku  $t$ . U jednadžbu (3.9) moramo uključiti  $e^{-q\tau}$  kao prinos od dividende:

$$C(K) = S_t e^{-q\tau} P_1 - K e^{-r\tau} P_2. \quad (4.7)$$

Cijenu put opcije možemo izraziti iz call-put pariteta

$$P(K) = C(K) + K e^{-r\tau} - S_t e^{-q\tau}.$$

### 4.3 Black-Scholesov model kao poseban slučaj Hestonovog modela

Black-Scholesov model pretpostavlja da je kretanje cijene  $S_t$  obzirom na mjeru neutralnu na rizik  $\mathbb{Q}$  dano stohastičkom diferencijalnom jednadžbom:

$$dS_t = rS_t + \sigma_{BS} S_t d\widetilde{W}_t.$$

Kako bi došli do rješenja ove jednadžbe najprije primjenjujemo Itôvu lemu kako bismo dobili kretanje procesa logaritamskih cijena dionica  $d \ln S_t$  iz čega dobivamo dobro poznato geometrijsko Brownovo gibanje dano sa:

$$S_t = S_0 \exp\left[\left(r - \frac{\sigma_{BS}^2}{2}\right)t + \sigma_{BS} \widetilde{W}_t\right].$$

Iz toga slijedi da je uvjetno na  $\mathcal{F}_t$  prirodni logaritam cijene dionice  $\ln S_T$  normalno distribuirana slučajna varijabla s varijancom  $\sigma_{BS}^2 \tau$  i očekivanjem  $\ln S_t + \left(r - \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2\right)\tau$  pri čemu je  $\tau = T - t$  vrijeme do isteka opcije. Iz toga slijedi da za prirodni logaritam cijene dionice,  $\ln S_T$  u Black-Scholesovom modelu vrijedi:

$$\mathbb{E}[e^{i\phi \ln S_T} | \mathcal{F}_t] = \exp\left(i\phi \left[\ln S_t + \left(r - \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2\right)\tau\right] - \frac{1}{2}\phi^2 \sigma_{BS}^2 \tau\right). \quad (4.8)$$

Black-Scholesova parcijalna diferencijalna jednadžba dana je sa:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2 S^2 \frac{\partial^2 U}{\partial S^2} + rS \frac{\partial U}{\partial S} - rU = 0.$$

Cijena call opcije u Black-Scholesovom modelu dana je sa:

$$C_{BS}(K) = S_t \Phi(d_1) - K e^{-r\tau} \Phi(d_2)$$

pri čemu su

$$d_1 = \frac{\ln(S_t/K) + (r + \sigma_{BS}^2/2)\tau}{\sigma_{BS} \sqrt{\tau}}$$

$$d_2 = \frac{\ln(S_t/K) + (r - \sigma_{BS}^2/2)\tau}{\sigma_{BS} \sqrt{\tau}} = d_1 - \sigma_{BS} \sqrt{\tau}$$

te  $\Phi$  funkcija distribucija jedinične normalne razdiobe. Pretpostavljamo da je volatilitnost  $\sigma_{BS}$  konstantna. Uzmemo li  $\sigma = 0$  Riccatijeva jednadžba (4.2) postaje diferencijalna jednadžba prvog reda

$$\frac{\partial D_j}{\partial \tau} = P_j - Q_j D_j,$$

pri čemu je  $P_j = u_j i \phi - \frac{1}{2} \phi^2$  te  $Q_j = b_j$ . Rješenje ove diferencijalne jednadžbe je

$$D_j(\tau, \phi) = \frac{(u_j i \phi - \frac{1}{2} \phi^2)(1 - e^{-b_j \tau})}{b_j}. \quad (4.9)$$

Općenito u slučaju  $\sigma > 0$  možemo (4.9) uvrstiti u izraz za  $C_j$  u drugoj jednadžbi (3.27) te integrirati

$$C_j(\tau, \phi) = r i \phi \tau + a \int_0^\tau \frac{(u_j i \phi - \frac{1}{2} \phi^2)(1 - e^{-b_j y})}{b_j} dy + H_1$$

$$= r i \phi \tau + \frac{a(u_j i \phi - \frac{1}{2} \phi^2)}{b_j} \left[ \tau - \frac{(1 - e^{-b_j \tau})}{b_j} \right] \quad (4.10)$$

gdje smo koristili početni uvjet  $C_j(0, \phi) = 0$  iz kojega slijedi  $H_1 = 0$ .

Uvrštavamo dobivene  $C_j$  i  $D_j$  u izraz za karakterističnu funkciju te radimo isto kao u slučaju  $\sigma > 0$ . Koeficijent korelacije,  $\rho$ , se više ne pojavljuje u izrazima za  $C_j$  i  $D_j$ .

Nadalje, promatramo slučaj kada je  $j = 2$ . Uvodimo  $u_2 = -\frac{1}{2}$  i  $b_2 = \kappa$  (uz  $\lambda = 0$ ) u jednadžbe (4.9) i (4.10), pretpostavljamo  $\theta = v_0$  te supstituiramo dobivene rezultate za  $D_2(\tau, \phi)$  i  $C_2(\tau, \phi)$  u karakterističnu funkciju (3.25). Drugu karakterističnu funkciju uvjetno na  $\mathcal{F}_t$  možemo zapisati kao:

$$f_2(\phi) = \exp\left(i\phi \left[ x_0 + \left( r - \frac{1}{2} v_0 \right) \tau \right] - \frac{1}{2} \phi^2 v_0 \tau \right) \quad (4.11)$$

gdje je  $x_0 = \ln S_0$  početna logaritamska cijena dionica, a  $v_0$  konstantna varijanica. Jednadžba (4.11) jednakog je oblika kao jednadžba (4.8) uz karakterističnu funkciju  $x_T = \ln S_T$  u Black-Scholesovom modelu, te uz Black-Scholesovu volatilitnost  $\sigma_{BS} = \sqrt{v_0}$ .

Pri mjeri neutralnoj na rizik  $\mathbb{Q}$ , cijena dionice  $S_T$  uvjetno na  $\mathcal{F}_t$  ima log normalnu distribuciju s varijancom  $\sigma_{BS}^2 \tau$  i očekivanjem  $\ln S_t + (r - \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2)\tau$  pomoću čega dobivamo:

$$\mathbb{Q}(S_T > K | \mathcal{F}_t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln K}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(S_t/K) + (r - \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2)\tau}{\sigma_{BS} \sqrt{\tau}}\right) = \Phi(d_2).$$

Primjenom mjere kao u (3.10) dobivamo

$$\begin{aligned} \mathbb{Q}^S(S_T > K | \mathcal{F}_t) &= \int_K^\infty d\mathbb{Q}^S = \int_K^\infty \frac{d\mathbb{Q}^S}{d\mathbb{Q}} d\mathbb{Q} = \frac{e^{-r(T-t)}}{S_t} \int_K^\infty S_T q_T(x) dx \\ &= \frac{e^{-r\tau}}{S_t} \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[S_T | S_T > K] \end{aligned} \quad (4.12)$$

pri čemu je  $q_T(x)$  funkcija gustoće od  $S_T$ . Supstitucijom varijance i očekivanja od  $S_T$  te uvrštavanjem dobivenog izraza u posljednju liniju u jednadžbi (4.12) dobivamo

$$\mathbb{Q}^S(S_T > K | \mathcal{F}_t) = \Phi\left(\frac{\ln(S_t/K) + (r + \frac{1}{2}\sigma_{BS}^2)\tau}{\sigma_{BS} \sqrt{\tau}}\right) = \Phi(d_1).$$

Zbog toga, cijena Black-Scholesove call opcije može biti zapisana u formi jednadžbe (3.11) na sljedeći način:

$$C(K) = S_t \mathbb{Q}^S(S_T > K | \mathcal{F}_t) - Ke^{-r\tau} \mathbb{Q}(S_T > K | \mathcal{F}_t).$$

# Poglavlje 5

## Diskretizacija

Pod pojmom diskretna shema shvaćamo aproksimaciju neprekidnih diferencijalnih jednažbi pomoću diskretnih diferencijalnih jednažbi. Kako bismo prikazali kretanje cijene dionice  $S = (S_t; t \geq 0)$  potrebno je promatrati stohastičku varijancu  $v = (v_t; t \geq 0)$ . Proces stohastičke varijance primjer je Cox-Ingersoll-Ross-ovog procesa koji je u početku korišten za modeliranje kratkoročnih kamatnih stopa. Iako postoje točne metode za simuliranje, slabije se koriste zbog male brzine izvršavanja. Cox-Ingersoll-Ross-ov proces nije definiran za negativne vrijednosti. Zbog toga moramo posebno analizirati proces kada je trenutna vrijednost u okolini nule. Potrebna nam je shema koja se ponaša drugačije u okolini nule, ali i dalje daje rezultat koji konvergira ispravnoj metodi. U Cox-Ingersoll-Ross-ovom modelu volatilitet  $\sigma$  utječe na negativan predznak modela.

### 5.1 Diskretizacija drugog reda za Cox-Ingersoll-Ross-ov model

Pomoću [1] Cox-Ingersoll-Ross-ov proces možemo zapisati u integralnoj formi kao:

$$X_t^x = x + \int_0^t (a - kX_s^x) ds + \sigma \int_0^t \sqrt{X_s^x} dW_s$$

s parametrima  $(a, k, \sigma) \in \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+$ , pri čemu je  $t \in [0, T]$ , a  $x \geq 0$ . Ovim procesom modeliramo proces volatiliteta u Hestonovom modelu.

Nadalje, uvodimo generator Hestonovog modela:

$$L^{CIR} f(x) = (a - \kappa x) \partial_x f(x) + \frac{1}{2} \sigma^2 x \partial_x^2 f(x).$$

## 5.2 Ninomiya-Victoir shema

Koristeći teorem [1, Theorem 1.18] vidimo da operator  $L^{CIR}$  možemo rastaviti na dva procesa tako da je

$$L^{CIR} = V_0^{CIR} + \frac{1}{2}(V_1^{CIR})^2$$

pri čemu su:

$$V_0^{CIR} f(x) = (a - \kappa x - \frac{\sigma^2}{4})f'(x)$$

$$V_1^{CIR} f(x) = \sigma \sqrt{x}f'(x).$$

Eksplícitno možemo riješiti obične diferencijalne jednađžbe povezane sa  $V_0^{CIR}$  i  $V_1^{CIR}$  te dobivamo sljedeća rješenja:

$$X_0^{CIR}(t, x) = xe^{-\kappa t} + (a - \frac{\sigma^2}{4})\Psi_\kappa(t) \quad (5.1)$$

$$X_1^{CIR}(t, x) = (\sqrt{x} + \frac{\sigma}{2}t)^2 \quad (5.2)$$

gdje je:

$$\Psi_\kappa(t) = \begin{cases} \frac{1-e^{-\kappa t}}{\kappa}, & \kappa \neq 0 \\ t, & \kappa = 0. \end{cases}$$

Iz drugog dijela jednađžbe (5.1) vidimo da Ninomiya-Victoir-ova shema nije definirana za  $\sigma^2 > 4a$  jer je u tom slučaju vrijednost od  $X_0^{CIR}$  manja od 0. Originalno dobijemo da je  $X_1^{CIR}(t, x) = ((\sqrt{x} + \frac{\sigma}{2}t)^+)^2$ , ali Ninomiya i Victoir zapisuju jednađžbu samo za pozitivne vrijednosti.

Ninomiya-Victoir-ovu shemu za Cox-Ingersoll-Ross-ov proces  $\widehat{X}_t^x$  definiramo sa

$$\widehat{X}_t^x(x, t) = e^{-\frac{\kappa t}{2}} \left( \sqrt{\left(a - \frac{\sigma^2}{4}\right)\psi_\kappa\left(\frac{t}{2}\right) + e^{-\frac{\kappa t}{2}}x + \frac{\sigma}{2}\sqrt{t}N} \right)^2 + \left(a - \frac{\sigma^2}{4}\right)\psi_\kappa\left(\frac{t}{2}\right)$$

za  $\kappa \neq 0$  pri čemu proces nije definiran za  $\sigma^2 > 4a$  i male vrijednosti od  $x \geq 0$ , a  $N \sim N(0, 1)$  je normalno distribuirana slučajna varijabla.

## 5.3 Prilagodba diskretizacije kada je $\sigma^2 > 4a$

Shema koja je do sada pokazana dobra je u slučaju kada vrijedi  $\sigma^2 \leq 4a$ . U tom je slučaju diskretizacija uvijek ne-negativna. Ako to ne vrijedi, odnosno vrijedi da je  $\sigma^2 > 4a$

moramo prilagoditi shemu diskretizacije. U tom slučaju razlikujemo 2 sheme ovisno o tome jesmo li u okolini nule ili ne. Drugi je slučaj jednostavniji te ćemo ga rješavati pomoću jednostavne prilagodbe Ninomiya-Victoir sheme. Budući da normalna distribucija ima pozitivnu gustoću nad skupom  $\mathbb{R}$ , postoji šansa da naš proces volatilnosti poprime negativne vrijednosti. To možemo postići korištenjem normalne slučajne varijable koja može biti aproksimirana pomoću diskretnih slučajnih varijabli pri čemu koraci odgovaraju momentima. Primjer diskretne slučajne varijable odgovarajuće distribucije je:

$$\begin{pmatrix} -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 \end{pmatrix}.$$

Ideja supstitucije je da ako imamo ograničenu distribuciju, lako možemo provjeriti postoji li vjerojatnost poprivanja negativnih vrijednosti u čijem slučaju kažemo da smo u okolini nule i primijenimo drugu shemu.

Posljednja situacija koju promatramo je kada je diskretizacijska shema blizu 0. Potencijalno rješenje možemo dobiti aproksimacijom modela pomoću slučajne varijable  $\widehat{X}_t^x$ . U tom će slučaju varijabla  $\widehat{X}_t^x$  poprimiti dvije vrijednosti;  $x_+(t, x) > x_-(t, x) \geq 0$  s pripadnim vjerojatnostima  $\pi(t, x)$  i  $1 - \pi(t, x)$

$$\begin{pmatrix} x_-(t, x) & x_+(t, x) \\ 1 - \pi(t, x) & \pi(t, x) \end{pmatrix}.$$

Budući da želimo da su vrijednosti  $\widehat{X}_t^x$  i  $X_t^x$  jednake, mora vrijediti:

$$\begin{aligned} \widetilde{u}_1(t, x) &= \pi(t, x)x_+(t, x) + (1 - \pi(t, x))x_-(t, x) \\ \widetilde{u}_2(t, x) &= \pi(t, x)x_+(t, x)^2 + (1 - \pi(t, x))x_-(t, x)^2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

pri čemu je

$$\widetilde{u}_q(t, x) = \mathbb{E}[(X_t^x)^q]$$

za  $q = 1, 2$ . Računanjem dobivamo sljedeća rješenja:

$$\begin{aligned} \widetilde{u}_1(t, x) &= xe^{-kt} + a\psi_\kappa(t) \\ \widetilde{u}_2(t, x) &= \widetilde{u}_1(t, x)^2 + \sigma^2\psi_\kappa(t)[a\psi_\kappa(t)/2 + xe^{-kt}]. \end{aligned}$$

Kako bismo izračunali vjerojatnost  $\pi(t, x)$  ponovno koristimo jednadžbe (5.3):

$$\pi^2(t, x) - \pi(t, x) + \frac{\widetilde{u}_1(t, x)^2}{4\widetilde{u}_2(t, x)} = 0.$$

Rješavanjem jednadžbe i uzimanjem većeg rješenja dobivamo

$$\pi(t, x) = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\widetilde{u}_1(t, x)^2}{\widetilde{u}_2(t, x)}}}{2}. \quad (5.4)$$

## 5.4 Diskretizacija Hestonovog modela

Podsjetimo se, Hestonov model primjenom dekompozicije Choleskog možemo zapisati kao:

$$dv_t = (a - kv_t)dt + \sigma \sqrt{v_t} dW_t^{(2)} \quad (5.5)$$

$$dS_t = \mu S_t dt + \sqrt{v_t} S_t (\rho dW_t^{(2)} + \sqrt{1 - \rho^2} dW_t^{(1)}). \quad (5.6)$$

Neka je  $\Pi$  proizvoljna particija segmenta  $[0, T]$ . Kako bismo mogli prikazati kretanje cijene dionice pomoću dva Brownova gibanja definiramo Stratonovičev integral sa:

$$\int_0^T X_t \circ W_t = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{X_{t_{i+1}} + X_{t_i}}{2} (W_{t_{i+1}} - W_{t_i}).$$

Uvodimo dodatan proces  $dX_t^2$  sa:

$$dX_t^2 = v_t dt$$

te dobivamo rješenje za  $S_t^{W^{(2)}}$ :

$$S_t^{W^{(2)}} = S_0^{W^{(2)}} \exp \left[ \left( \mu - \frac{\rho}{\sigma} a \right) t + \left( \frac{\rho}{\sigma} k - \frac{1}{2} \right) (X_t^2 - X_0^2) + \frac{\rho}{\sigma} (v_t - v_0) \right]$$

i rješenje za  $S_t^{W^{(1)}}$ :

$$S_t^{W^{(1)}} = S_0^{W^{(1)}} \exp \left( \sqrt{(1 - \rho^2) v_t} N \right)$$

pri čemu je  $N \sim N(0, 1)$  normalno distribuirana slučajna varijabla.

Na ovaj smo način konstruirali diskretizacijsku shemu drugog reda za Cox-Ingersoll-Ross-ov proces bez restrikcije na parametre, posebno shema prihvaća velike vrijednosti parametra  $\sigma$ . Drugi doprinos sheme jest korištenje Ninomiya-Victoir sheme kako bismo dobili rekurzivnu konstrukciju shema drugoga reda. Iako kod Hestonovog modela nisu direktno zadovoljene sve pretpostavke, rezultati imaju smisla. Točna analiza pogreške u Hestonovom modelu zahtijeva veliku analizu po trenutcima.



# Poglavlje 6

## Prilagodba modela i simulacija u R-u

Prilagodba modela zapravo je pronalaženje parametara modela koji će najbolje prikazati dane podatke. Korišteni podaci mogu biti povijesni u slučaju da želimo dobiti parametre neovisne o vremenu kako bismo promatrali njihov razvoj. Alternativno, podatke možemo prilagoditi samo trenutnim podacima i dobiti ili vremenski ovisne parametre ili parametre nastale pod pretpostavkom da je vrijeme nepromjenjivo.

Alternativna prilagodba ima određene posljedice; u tom slučaju, koristimo statističke alate kako bismo dobili parametre modela, npr. računamo sredinu između dvije povijesne vrijednosti kako bismo dobili srednju stopu povrata. U prilagodbi, temeljne parametre dobivamo pomoću procjena; na primjer metodom maksimalne vjerodostojnosti, modelima predviđanja grešaka itd.

### 6.1 Inverzni pristup

Najbolji pristup prilagodbe Hestonovog modela je inverznim pristupom ili tržišno impliciranim pristupom ("market implied approach"). Kako bismo dobili sve parametre odjednom; pretpostavljamo da su postojeće cijene na tržištu blizu stvarnih cijena financijskih instrumenata. Kao posljedicu, dobivamo da prilagodba modela ovisi o već postojećim instrumentima što znači da su nam potrebne potpune informacije o tržištu kako bismo dobili parametre modela. U slučaju da tržište nije dovoljno likvidno, osobe koje trguju pristat će na ne-fer cijenu imovine što može biti dovoljan poticaj za pokušaj uklapanja u model. Ideja prilagodbe Hestonovog modela je minimizacija funkcije razlike između cijena na tržištu za čistu Europsku opciju  $C^{market}$  i cijenu dobivenu Hestonovom jednadžbom  $C^{heston}$ . Jednostavna funkcija za analizu razlike dana je sa:

$$f(K_i, T_i) = \min_{\xi} \sum_i |C_i^{market} - C_i^{heston}|$$

pri čemu  $i$  označava  $i$ -tu promatranu opciju na tržištu s cijenom izvršenja  $K_i$  i vremenom dospijeća  $T_i$ , a  $\xi$  označava skupinu početnih parametara. Izbor funkcije prilagodbe ne bi bio složen kada bi model savršeno opisivao podatke i kada bi algoritam optimizacije uvijek pronalazio globalni minimum. No, u našem slučaju, podaci često nisu savršeni. Za algoritam optimizacije, koristimo funkciju `nlm` u R-u.

## 6.2 `nlm` i `nlmminb` funkcije u R-u

Nelinearna optimizacijska funkciju u R-u označena je sa `nlm`. Parametri potrebni za poziv funkcije:

- `f` - optimizacijska funkcija koju želimo minimizirati. U našem slučaju, to je razlika između cijene na tržištu i one dobivene Hestonovim modelom;
- `p` - početni parametar od kojeg naša optimizacija započinje potragu za minimumom. U našem slučaju, unosimo početne procjene parametara za Hestonov model.

Dodatno, moguće je uključiti još parametara optimizacijske funkcije kao i dodatne numeričke parametre za optimizaciju; kao što je maksimalan broj koraka koje funkcija optimizacije može napraviti ili broj iteracija koje dozvoljavamo optimizacijskoj funkciji. Trebamo uzeti u obzir da je potrebno promijeniti parametre ako rezultat ne zadovoljava traženu točnost ili povećati brzinu konvergencije kada tražimo manje točno rješenje. Kada funkciju prilagođavamo stvarnim podacima, funkcija ne mora nužno prihvaćati sve podatke. U nekim slučajevima to može dovesti do prekoračenja veličine ("over-fitting").

Alternativno možemo koristiti `nlmminb` funkciju koja uzima dva dodatna parametra; `lower` i `upper`. Oni služe kao granice za naše parametre. Vrijednosti funkcije `nlmminb` su podskup rješenja funkcije `nlm` pa mogu slabije odgovarati traženom rješenju kada ih usporedimo. To je cijena koja odgovara rješenju prilagodbe modela i pretpostavkama kakve bismo željeli.

Prilagodbu možemo poboljšati množenjem razlika težinama; primjerice s jednim od Grka - mjerom rizika Vega. Vega mjeri intenzitet volatilnosti opcije osnovne imovine. Dodatno, možemo se odlučiti kvadrirati, a zatim korjenovati razlike na sljedeći način:

$$f(K_i, T_i) = \min_{\xi} \sqrt{\sum_i \omega_i (C_i^{\text{market}} - C_i^{\text{heston}})^2}.$$

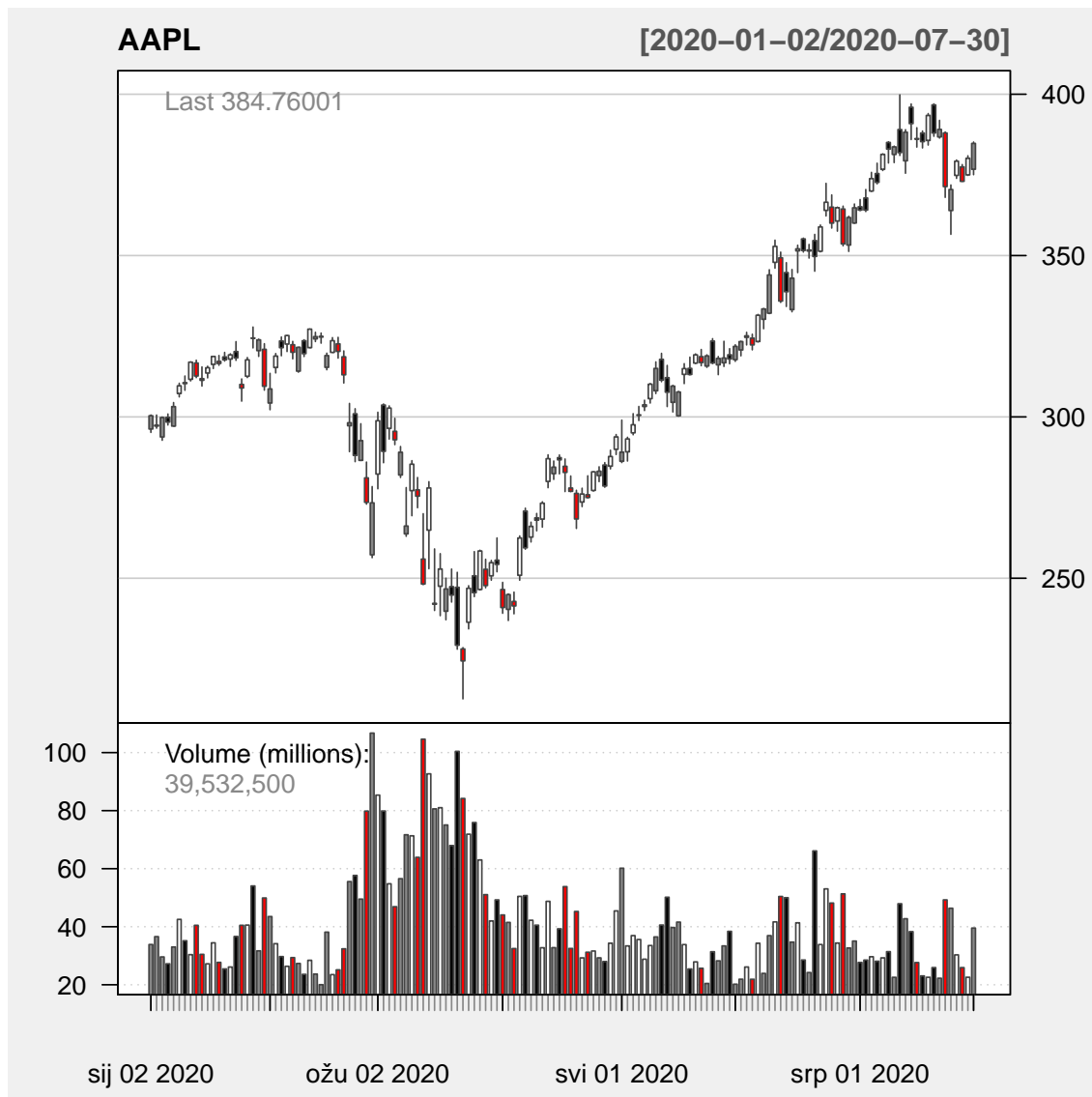
## 6.3 quantmod paket u R-u

Podatke u program R možemo učitati direktno koristeći neki od paketa; `quantmod` paket direktno preuzima podatke s online repozitorija kao što je Yahoo finance. U našem slučaju koristit ćemo upravo taj repozitorij.

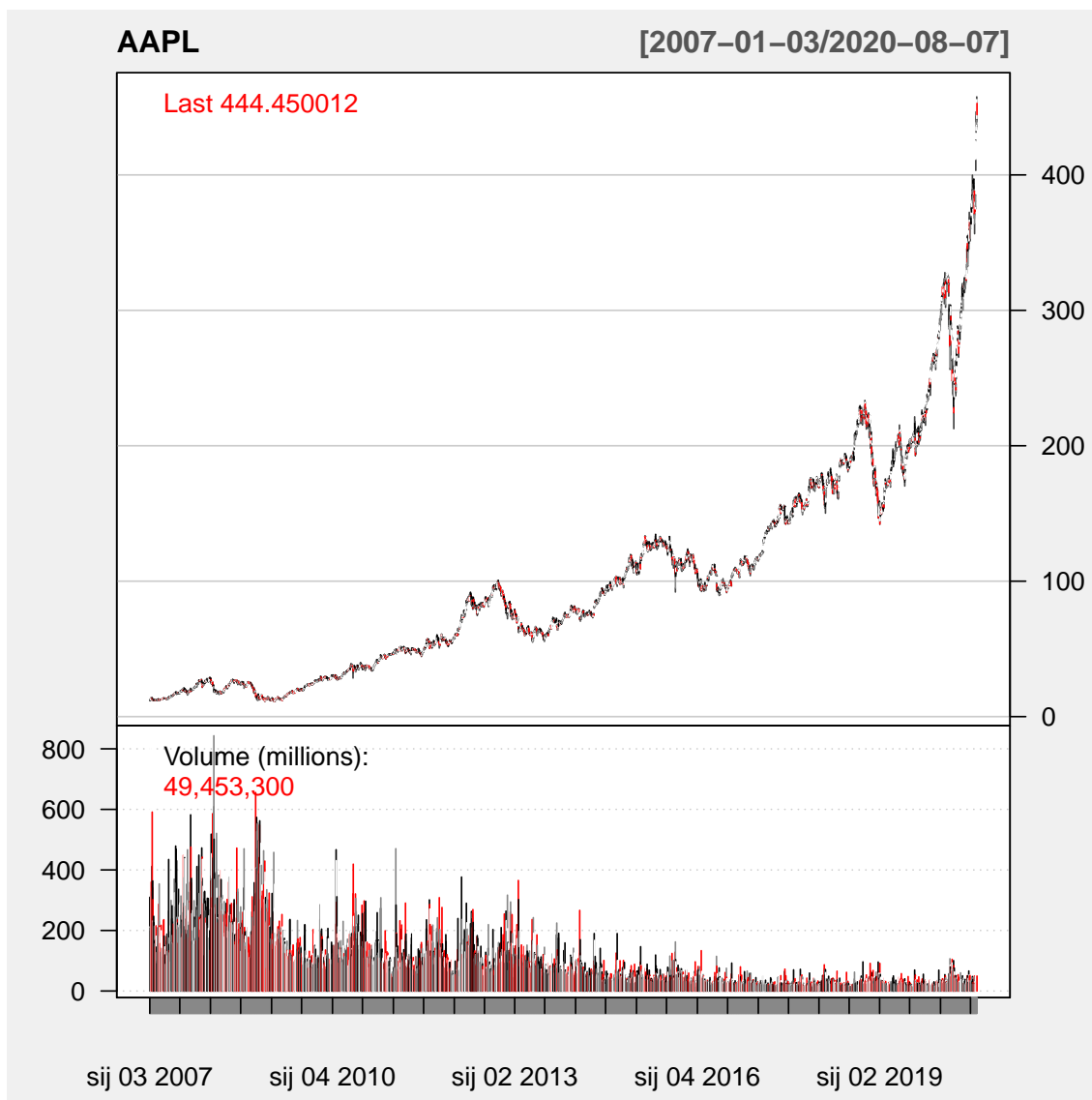
Podatke učitavamo funkcijom `getSymbols`; argumenti potrebni funkciji su naziv dionice čije nas vrijednosti zanimaju te proizvoljno možemo dodati početni i krajnji datum razdoblja za koje promatramo cijenu dionice. Funkcija vraća više podataka:

- `open` - početna cijena dionice;
- `high` - najviša cijena dionice ostvarena tog dana;
- `low` - najniža cijena dionice ostvarena tog dana;
- `close` -završna cijena dionice;
- `volume` - volumen trgovanja;
- `adjusted` - prilagođena cijena.

Funkcije `head` i `tail` ispisuju 6 početnih odnosno krajnjih vrijednosti dionice. Jedna od korištenih funkcija za grafički prikaz podataka je `chartSeries` te dodatno na grafu možemo prikazati pokazatelj divergentnosti prosječne pokretljivosti `addMACD` ili linije ispod i iznad srednje razine cijena `addBBands`. Sljedeći grafički prikazi prikazuju kretanje cijene dionice APPLE.



Slika 6.1: Prikaz kretanja cijene dionice APPLE tijekom ove godine.



Slika 6.2: Prikaz kretanja cijene dionice APPLE za razdoblje od 2007. godine do danas.



# Bibliografija

- [1] Aurelien Alfonsi, *A second-order discretization scheme for the CIR process: application to the Heston model*, 2008.
- [2] F. Mercurio D. Brigo, *Interest Rate Models - Theory and Practice: With Smile, Inflation, and Credit*, Springer Finance, 2006.
- [3] Steven E. Shreve, *Stochastic calculus for finance; Continuous-Time Models*, Springer Finance, 2004.
- [4] J. Gil-Pelaez, *Note on the Inversion Theorem*, sv. 38, Biometrika, 1951.
- [5] Fabrice Douglas Rouah, *The Heston Model And Its Extensions in Matlab and C*, Wiley, 2013.
- [6] Zoran Vondraček, *Skripta iz Financijskog modeliranja*, 2008, <https://web.math.pmf.unizg.hr/~vondra/2fm17-predavanja.html>, posjećena 2020-10-30.
- [7] Yuan Yang, *Valuing a European option with the Heston model*, Rochester Institute of Technology, 2013.





# Sažetak

Hestonov model najpopularniji je model stohastičke volatilnosti za određivanje cijena opcija. Djelomično je za to zaslužna njegova zatvorena forma. Neki autori cijenu call opcije nazivaju poluzatvorenom zbog numeričke integracije koja je potrebna da bismo zadržali  $P_1$  i  $P_2$ . No, Black-Scholesov model također zahtjeva numeričku integraciju, kako bi zadržao  $\Phi(d_1)$  i  $\Phi(d_2)$ . U tom smislu, Hestonov model daje cijene call opcija koje nisu manje zatvorene od onih u Black-Scholesovom modelu. Razlika je u tome što programski jezici često imaju naviku koristiti standardnu normalnu distribuciju dok Hestonove vjerojatnosti nisu ugniježdene te ih se mora dograditi koristeći numeričku integraciju.



# Summary

Heston model is the most popular model of stochastic volatility for determination option price. The reason for that is its closed form. Some authors may call the price of the call option semi-closed because of the numeric integration that is needed to keep  $P_1$  and  $P_2$ . Black-Scholes model also demands numeric integration to keep  $\Phi(d_1)$  and  $\Phi(d_2)$ . In that sense, Heston model gives prices of call options that are not less closed than the ones in Black-Scholes model. The difference is that programming languages have the habit to use standard normal distribution while Heston's probabilities are not included and we have to include them by using numeric integration.



# Životopis

Rođena sam 2. ožujka 1996. godine u Bjelovaru. Tamo završavam osnovnu školu, a nakon nje upisujem Gimnaziju Bjelovar. Godine 2014. upisujem preddiplomski sveučilišni studij Matematika na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, koji završavam 2018. godine te stječem naziv sveučilišni prvostupnik matematike. Iste godine upisujem diplomski studij Financijska i poslovna matematika, kojeg završavam ovim radom.